



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE CIENCIAS**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

#### **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FOTO-FENTON CON LUZ ARTIFICIAL A DIFERENTES POTENCIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA”**

##### **Trabajo de titulación:**

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**AUTORA:** EVELYN NATALIA SEGOVIA OBANDO

**DIRECTOR:** Dr. JOSÉ GERARDO LEÓN CHIMBOLEMA

Riobamba - Ecuador

2020

**©2020, Evelyn Natalia Segovia Obando**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Evelyn Natalia Segovia Obando, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 26 de noviembre de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Evelyn Segovia', with the first part of the name circled.

**Evelyn Natalia Segovia Obando**

**060476571-9**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA  
AMBIENTAL**

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de investigación, **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FOTO-FENTON CON LUZ ARTIFICIAL A DIFERENTES POTENCIAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA**, realizado por la señorita: **EVELYN NATALIA SEGOVIA OBANDO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

FAUSTO  
MANOLO  
YAULEMA  
GARCES

Firmado digitalmente  
por FAUSTO MANOLO  
YAULEMA GARCES  
Fecha: 2020.12.01  
11:44:41 -05'00'

Dr. Fausto Manolo Yaulema Garcés  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

2020-11-26



Firmado electrónicamente por:  
**JOSE GERARDO  
LEON CHIMBOLEMA**

Dr. José Gerardo León Chimbolema  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

2020-11-26

LUIS MIGUEL  
SANTILLAN  
QUIROGA

Firmado digitalmente  
por LUIS MIGUEL  
SANTILLAN QUIROGA  
Fecha: 2020.12.01  
10:16:12 -05'00'

Ing. Luis Miguel Santillán Quiroga  
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

2020-11-26

## **DEDICATORIA**

A todas las mujeres científicas, que a pesar de las limitaciones sociales se esfuerzan por descubrir, innovar y aplicar la ciencia en todos los ámbitos para resolver los problemas de nuestro entorno y lograr un mundo mejor.

Evelyn

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por mostrarme un camino de servicio al mundo, con amor y compromiso.

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y todos mis maestros por brindarme sus conocimientos y experiencias en la formación profesional y humanitaria para el servicio a la sociedad.

Al doctor Gerardo León, tutor del presente trabajo de titulación, por su valiosa contribución con conocimientos, tiempo y dedicación.

A la doctora Gina Álvarez, por toda su motivación, conocimientos y apoyo durante el desarrollo experimental del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros, de manera especial a Katherine, Bárbara y Valeria por su apoyo desinteresado, amistad y compañía cada uno de mis años universitarios.

Y de manera especial a las personas más importantes, mis padres, Jorge y Zonia, por ser mi ejemplo y soporte, por su apoyo incondicional, esfuerzo y amor durante todo mi proceso estudiantil. Y a mis hermanas Gabriela y Cinthia por acompañarme en este largo caminar.

Evelyn

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY/ABSTRACT.....	
¡Error! Marcador no definido.	
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Aguas residuales.....	4
1.1.1. Aguas residuales lácteas.....	4
1.1.2. Composición de las aguas residuales lácteas.....	4
1.1.3. Contaminación producida por la industria láctea.....	7
1.2. Tratamiento de aguas residuales.....	7
1.3. Procesos de oxidación avanzada (POA).....	8
1.3.1. Proceso Fenton y Foto-fenton.....	9
<b>CAPÍTULO II</b>	
2. MARCO METODOLÓGICO.....	17
2.1. Tipo de Investigación .....	17
2.2. Diseño de la Investigación .....	17
2.2.1. Diseño Experimental / Cuasi Experimental / Pre Experimental .....	17
2.3. Técnicas de recolección de datos.....	22
2.3.1. Materiales, equipos y reactivos .....	22
2.3.2. Métodos y técnicas .....	23
<b>CAPÍTULO III</b>	
3. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29

<b>3.1.</b>	<b>Caracterización del agua residual láctea .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.</b>	<b>Aplicación del método Fenton.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.1.</b>	<b><i>Concentración Óptima de Hierro y Peróxido de hidrógeno .....</i></b>	<b>31</b>
<b>3.2.2.</b>	<b><i>Ajuste de pH.....</i></b>	<b>39</b>
<b>3.3.</b>	<b>Aplicación del método Foto-fenton.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.</b>	<b>Análisis de la variación de la carga contaminante .....</b>	<b>44</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>48</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Características de aguas residuales lácteas.....	5
<b>Tabla 2-1:</b>	Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.....	8
<b>Tabla 3-1:</b>	Principales reacciones descritas en el proceso Fenton .....	10
<b>Tabla 4-1:</b>	Revisión de la aplicación y principales resultados del método Fenton y Foto-fenton.....	12
<b>Tabla 5-2:</b>	Matriz de consistencia .....	18
<b>Tabla 6-2:</b>	Operacionalización de variables .....	19
<b>Tabla 7-2:</b>	Ubicación geográfica de la quesera “Airón”.....	20
<b>Tabla 8-2:</b>	Ubicación geográfica del laboratorio de Calidad del Agua - ESPOCH .....	21
<b>Tabla 9-2:</b>	Métodos usados por Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH .....	24
<b>Tabla 10-2:</b>	Métodos usados por Laboratorio AQMIC .....	24
<b>Tabla 11-3:</b>	Resultados de análisis del Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH para el análisis físico-químico y biológico de las aguas residuales .....	29
<b>Tabla 12-3:</b>	Resultados de análisis del Laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos AQMIC .....	29
<b>Tabla 13-3:</b>	Análisis de la muestra inicial .....	30
<b>Tabla 14-3:</b>	Optimización del método Fenton .....	31
<b>Tabla 15-3:</b>	Optimización de pH en el método fenton a partir de la reducción de turbidez ....	39
<b>Tabla 16-3:</b>	Análisis microbiológico del agua previo a la aplicación del proceso Foto-fenton..	41
<b>Tabla 17-3:</b>	Aplicación del método Foto-fenton.....	41
<b>Tabla 18-3:</b>	Análisis de la eficiencia de remoción de la carga contaminante .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Espectro electromagnético.....	9
<b>Figura 2-1:</b> Comportamiento de las partículas y la luz UV .....	15
<b>Figura 3-2:</b> Mapa de ubicación de la quesera “Airón” .....	20
<b>Figura 4-2:</b> Reactor UV con lámpara de 40 watts .....	27

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Variación de la turbidez a 4500 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	32
<b>Gráfico 2-3:</b>	Variación de la turbidez a 6000 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	33
<b>Gráfico 3-3:</b>	Variación de la DQO a 6000 mg/L de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	34
<b>Gráfico 4-3:</b>	Variación de la turbidez a 300 mg/L de Fe <sup>2+</sup> .....	35
<b>Gráfico 5-3:</b>	Variación de la DQO a 300 mg/L de Fe <sup>2+</sup> .....	35
<b>Gráfico 6-3:</b>	Análisis de la turbidez en el método fenton.....	37
<b>Gráfico 7-3:</b>	Análisis de la DQO en el método fenton .....	38
<b>Gráfico 8-3:</b>	Análisis del pH.....	40
<b>Gráfico 9-3:</b>	Variación de coliformes fecales a una potencia de 10 Watts.....	42
<b>Gráfico 10-3:</b>	Variación de coliformes fecales a una potencia de 20 Watts.....	42
<b>Gráfico 11-3:</b>	Variación de coliformes fecales a una potencia de 40 Watts.....	43

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>ANEXO A</b>	<b>MUESTREO</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>OPTIMIZACIÓN DE REACTIVOS FENTON</b>
<b>ANEXO D</b>	<b>AJUSTE DE pH</b>
<b>ANEXO E</b>	<b>MEDICIÓN DE PARÁMETROS</b>
<b>ANEXO F</b>	<b>APLICACIÓN DEL MÉTODO FOTO-FENTON</b>
<b>ANEXO G</b>	<b>TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE COLIFORMES</b>
<b>ANEXO H</b>	<b>ESPECIFICACIONES DE LAS LÁMPARAS UV</b>

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo analizar la eficiencia de Foto-fenton con luz artificial a diferentes potencias para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea. Se obtuvieron muestras de la quesera “Airón” ubicada en el cantón Chambo las cuáles se caracterizaron de manera físico-química y biológica, para conocer las condiciones iniciales. Los parámetros analizados fueron turbidez, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO) y coliformes fecales. El método fenton se aplicó en 12 tratamientos de 1000,00 mL de agua residual con variaciones en la concentración de  $Fe^{2+}$  (100,00 – 400,00) mg/L y  $H_2O_2$  (4500,00 a 6000,00) mg/L, los parámetros de respuesta fueron turbidez y DQO, la concentración óptima para cada reactivo se determinó mediante gráficas que mostraban la remoción de dichos contaminantes. Se ajustó el pH de 2,00 a 3,50 para su optimización a través del análisis de turbidez en las muestras. Con estas condiciones, se aplicó el método Foto-fenton en tres muestras de 1000,00 mL en tres reactores UV de 10, 20 y 40 Watts de potencia, registrando la variación de la carga biológica de 15 a 60 minutos. La eficiencia fue analizada mediante la variación de la carga contaminante total del agua residual antes y después del tratamiento. Las condiciones óptimas para el proceso Fenton fueron 331,50 mg/L de  $Fe^{2+}$  y 5537,00 mg/L de  $H_2O_2$  a un pH de 3,00, logrando reducir el 99,31% y 91,97% de turbidez y DQO respectivamente. El método Foto-fenton logró reducir hasta el 90,00% de coliformes fecales a una potencia de 40 watts y un tiempo de contacto de 60 minutos. Se concluye que el método Foto-fenton es eficiente para el tratamiento de aguas residuales lácteas, la remoción registrada para cada parámetro es superior el 90,00%. Se recomienda realizar un estudio de trazabilidad de los reactivos fenton para analizar su variabilidad en el tratamiento y optimizar el tiempo de retención para la remoción de contaminantes.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA SANITARIA>, <FOTO-FENTON>, <OXIDACIÓN AVANZADA>, <REACTORES UV>, <TURBIDEZ>, <DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO>, <COLIFORMES FECALES>

## ABSTRACT

The objective of this titration work was to analyze the efficiency of Photo-fenton with artificial light at different powers for the treatment of wastewater from the dairy industry. Samples were obtained from the “Airón” cheese factory located in the Chambo canton, which were characterized in a physico-chemical and biological way, to know the initial conditions. The parameters analyzed were: turbidity, suspended solids, biochemical oxygen demand (BOD5), chemical oxygen demand (COD) and faecal coliforms. The fenton method was applied in 12 treatments of 1000.00 mL of residual water with variations in the concentration of Fe<sup>2+</sup> + (100.00 - 400.00) mg / L and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (4500.00 to 6000.00) mg / L, the response parameters were turbidity and COD, the optimal concentration for each reagent was determined by means of graphs that showed the removal of said contaminants. The pH was adjusted from 2.00 to 3.50 for its optimization through the turbidity analysis in the samples. Under these conditions, the Photo-fenton method was applied to three 1000.00 mL samples in three UV reactors of 10, 20 and 40 Watts of power, recording the variation in the biological load from 15 to 60 minutes. Efficiency was analyzed by varying the total pollutant load of the wastewater before and after treatment. The optimal conditions for the Fenton process were 331.50 mg / L of Fe<sup>2+</sup> + and 5537.00 mg / L of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at a pH of 3.00, achieving a reduction of 99.31% and 91.97% of turbidity and COD respectively. The Photo-fenton method managed to reduce up to 90.00% of fecal coliforms at a power of 40 watts and a contact time of 60 minutes. It is concluded that the Photo-fenton method is efficient for the treatment of dairy wastewater, the removal registered for each parameter is greater than 90.00%. It is recommended to carry out a traceability study of fenton reagents to analyze their variability in treatment and optimize the retention time for the removal of contaminants.

**Keywords:** < SANITARY ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <PHOTO-FENTON>, <ADVANCED OXIDATION>, <UV REACTORS>, <TURBIDITY>, <CHEMICAL OXYGEN DEMAND>, <FECAL COLIFORMS>

## **INTRODUCCIÓN**

### **Identificación del problema**

La industria láctea representa un gran porcentaje de la productividad agroindustrial en el sector alimentario del Ecuador. (Centro de la Industria láctea del Ecuador 2015) Según datos de la Secretaría Nacional de Planificación “SENPLADES”, se encuentran asentados en el país 366 centros de depósito lácteo con una capacidad de más de 1542901,00 litros por día. Entre los impactos ambientales más significativos resultantes de esta actividad se encuentra la contaminación hídrica. La industria láctea en sus procesos de producción utiliza entre 1,30 - 3,20 L de agua/kg de leche y anualmente genera entre 3739,00 y 11217,00 millones de m<sup>3</sup> de efluente, es decir hasta tres veces el volumen de leche procesada. (Guillén, Millán y Araque 2014)

Las aguas residuales lácteas se caracterizan por una DBO entre 2000,00 y 3000,00 mg/L y una DQO entre 4000,00 y 9000,00 mg/L con un alto contenido de materia orgánica, sólidos disueltos y suspendidos que encierran grasas, aceites y nutrientes como amoníaco, minerales y fosfatos. (Aqualimpia Engineering e.K. 2019). En la mayoría de casos, estas son vertidas directamente a fuentes hídricas (Nemerow y Dasgupta 2000), en otros casos son usadas tecnologías de tratamiento convencionales que no logran reducir significativamente la carga contaminante.

Los Procesos de oxidación avanzada (POA) son altamente utilizados a nivel internacional debido a su eficiencia para tratamiento de aguas residuales industriales con cargas contaminantes similares a la industria láctea, es decir, de origen orgánico. Uno de los procesos más destacados de estas tecnologías es el método Foto-fenton, que puede reducir los principales contaminantes como DBO, DQO, Sólidos Suspendidos y Coliformes (Programa Consolider Tragua 2010).

En el país este proceso ha sido investigado y aplicado casi en su totalidad para el tratamiento de lixiviados, obteniendo importantes resultados. Pero limitando su investigación para diferentes tipos de aguas residuales, como es el caso de la industria de producción de lácteos, en dónde podría ser utilizado. Sin embargo, su aplicación se encuentra limitada debido al insuficiente soporte técnico y científico existente.

## **Formulación**

¿A qué potencia el método Foto-fenton es más eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea?

## **Justificación**

Las tecnologías convencionales de tratabilidad consisten en un tratamiento primario seguido de un tratamiento biológico (filtro de goteo, proceso de lodos activados, laguna anaerobia y laguna aerobia). Estos métodos son bastante eficientes para el tratamiento a gran escala. No obstante, el volumen de agua residual generada en la industria artesanal en las zonas rurales es pequeña, con grandes variaciones en la calidad. Los sistemas de tratamiento biológico son tecnologías altamente diseñados, por lo que requieren mucho capital e insumos de alta energía que proveen bajo porcentaje de rendimiento. La adopción de tales tecnologías para las pequeñas industrias lácteas no es posible desde la perspectiva financiera y de operación.

Por este motivo, es evidente la necesidad de investigar nuevas tecnologías que cumplan el grado de tratabilidad exigido por la legislación y permitan la recuperación de los recursos hídricos. Los procesos de oxidación avanzada constituyen una buena alternativa ya que, a más de lograr reducir significativamente la carga contaminante son de bajo costo y fácil de manejo.

El proceso de oxidación avanzada denominado Foto-fenton transforma químicamente el contaminante para alcanzar su mineralización y oxidación completa. En cambio, las tecnologías convencionales, al no oxidar completamente los compuestos orgánicos generan la formación de productos que pueden llegar a tener mayor toxicidad que el contaminante inicial.

Otras ventajas frente a los métodos convencionales son el bajo costo, facilidad de manejo y su transformación en productos inertes que no afectan el ambiente, que son el peróxido de hidrógeno y el hierro. A más de, las condiciones asequibles de manipulación y mantenimiento. El tratamiento es óptimo para aguas residuales industriales con porcentajes elevados de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbidez y carbono orgánico total (COT), logrando un porcentaje de remoción de 90 a 95%. Adicionalmente al incorporar luz

ultravioleta se eliminan agentes patógenos y en general todo tipo de material biológico contaminante.

Por todo lo mencionado, el método Foto-fenton es totalmente adaptable a la industria láctea, sea está a gran escala o artesanal, ya que se acopla a cualquier variación de caudal y calidad del agua residual, con menos recursos económicos y en menor tiempo logra cumplir los límites permisibles para su vertido al sistema de alcantarillado o fuentes hídricas. Mejora la calidad de producción industrial y contribuye al saneamiento ambiental.

El presente trabajo de investigación desarrollado en la línea de Tratamiento de recursos y residuos pretende brindar bases científicas para la aplicación de esta innovadora tecnología en el tratamiento del efluente lácteo que solucione uno de los problemas primordiales de contaminación ocasionado por el sector agroindustrial.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la eficiencia de Foto-fenton con luz artificial a diferentes potencias para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los parámetros óptimos de operación del método Fenton.
- Aplicar la metodología de Foto-fenton con potencias de 10, 20 y 40 watts para el tratamiento de aguas residuales.
- Analizar las variaciones de la carga contaminante de las aguas residuales después de la aplicación el método Foto-fenton.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO

#### 1.1. AGUAS RESIDUALES

Son aguas de composición muy variada que se originan en las descargas industriales, municipales, comerciales, agropecuarias, domésticas, etc. Que sufrieron alteración en sus características debido a una degradación en su calidad original. (Ministerio del Ambiente 2017)

##### *1.1.1. Aguas residuales lácteas*

La industria láctea y sus derivados se considera el mayor contribuyente de producción de efluentes de transformación de alimentos en muchos países, se requieren grandes cantidades de agua en todos los pasos del proceso productivo y de limpieza. En general el efluente se caracteriza por ser neutro o alcalino susceptible a la acidificación por su fermentación. (Tirado Armesto et al. 2016) Alta concentración de materia orgánica y grasas, DBO, DQO y sólidos en suspensión en donde se desarrollan varios tipos de microorganismos patógenos. El volumen, concentración y composición depende del tipo de producto, forma de producción y planta procesadora. (Farizoglu y Uzuner 2011)

##### *1.1.2. Composición de las aguas residuales lácteas*

(Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL) 2002) ha determinado las siguientes características de las aguas residuales lácteas:

- Alto contenido de materia orgánica, ocasionado por los componentes de la leche. La DQO se encuentran entre 1000,00 – 6000,00 mg /L.
- Presencia de aceites y grasas, debido al desprendimiento de la grasa de los productos lácteos y en procesos como el lavado de la mazada.
- Concentraciones elevadas de nitrógeno y fósforo, generados por el uso de productos de limpieza.

- Variaciones de pH entre 2,00 y 11,00. Procedentes de las fases operativas de limpieza y desinfección.
- Conductividad eléctrica elevada, por el uso de cloruro de sodio para salar el queso.
- Variaciones de temperatura (incluyendo las aguas de refrigeración).

**Tabla 1-1:** Características de aguas residuales lácteas

Parámetros	Kushwaha, Srivastava, y Mall, (2010b)	Torres, Rodríguez, y Uribe, (2003)	Arango y Sanches, (2009)	Santamaría, Álvarez, Díaz, y Zamora (2015)	Normativa Ecuatoriana TULSMA: Libro VI Anexo 1: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.	Normativa Ecuatoriana TULSMA: Libro VI Anexo 1: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.
pH	6,30 – 6,80	4,70	7,60	4,74	5,00 – 9,00	5,00 – 9,00
DQO (mg/L)	3900,00	-	24813,00	18400,00	250,00	500,00
DBO (mg/L)	2300,00	3300,00	-	12500,00	100,00	250,00
Sólidos Totales (mg/L)	3090,00	3030,00	40827,00	36620,00	1600,00	1600,00
Sólidos volátiles (mg/L)	2810,00	-	18164,00	4848,00	-	-
Sólidos suspendidos totales fijos (mg/L)	280,00	-	-	48480,00	100,00	220,00
Turbidez	1744,00	-	-	3921,00	-	-
Conductividad (S/cm)	220,00	-	-	7820,00	-	-
Coliformes fecales (Nmp/100 ml)	-	-	-	-	Remoción > 99.9%	-

Fuente: Kushwaha et al. (2010)

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

#### 1.1.2.1. Demanda química de oxígeno, DQO

“La (DQO) se utiliza para medir la fuerza orgánica de desechos industriales” (Gaibor 2014). Constituye el volumen de oxígeno que necesita la materia orgánica para su oxidación.

#### *1.1.2.2. Demanda bioquímica de oxígeno, DBO*

Es la cantidad o medida de oxígeno que los diferentes tipos de microorganismos utilizan para la degradación de las sustancias orgánicas contenidas. (Nihon Kasetu Europe 2017) Es decir, para la descomposición de la materia orgánica. (Gaibor 2014)

#### *1.1.2.3. Turbidez*

Reducción de la transparencia en el agua, indicador de la cantidad de material coloidal, mineral y orgánico que se puede deber a la contaminación del recurso. (Marcó et al. 2004)

#### *1.1.2.4. Contaminantes biológicos del agua*

Son agentes patógenos provenientes de residuos orgánicos que generan una alta carga contaminante representada por materia orgánica y microorganismos en su mayoría de origen fecal. Son causantes de enfermedades infecciosas con tasas considerables de mortalidad en la población y se transmiten al entrar en contacto con mucosas, heridas, excreciones o piel. Los organismos patógenos que se pueden encontrar son bacterias, protozoos o virus. Las principales enfermedades que causan son fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería y cólera. (CONAGUA 2011)

Una de las principales bacterias que se encuentran presentes en los efluentes son, Coliformes, estas son bacterias Gram negativas presentes en la capa superficial y sedimentos del agua residual que fermentan lactosa. Son considerados indicadores de la presencia de otros organismos patógenos. (bioMérieux España [sin fecha])

Estos parámetros permiten reconocer el grado de contaminación que va desde una condición relativamente natural hasta una totalmente modificada del agua, en este caso por el factor antrópico.

### ***1.1.3. Contaminación producida por la industria láctea***

En la industria láctea se generan grandes cantidades de efluentes compuestos por leche, crema de leche, suero que contienen grasas, aceites y sólidos suspendidos. (Valencia Denicia y Ramírez Castillo 2009) Entre los residuos se encuentran materiales caramelizados alcalinos que se convierten en hábitat de bacterias como *E.coli*. y generan su propagación en el medio. (Corpas y Fernando 2012) Su descarga sin previa tratabilidad se convierte en un foco importante de contaminación que genera alteración en las propiedades naturales del agua y que genera el desplazamiento de la biota natural. Además, de generar problemas de salud pública.

## **1.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

El tratamiento convencional combina procesos químicos, físicos y biológicos, en las fases: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario.

En el pretratamiento se da la disgregación de sólidos gruesos, con el fin de eliminar partículas suspendidas en el efluente, el tratamiento secundario o tratamiento biológico se realiza mediante microorganismos que remueven todo el contenido orgánico. Finalmente, el tratamiento terciario se encarga de la desinfección, es decir de la remoción del material biológico. (Valencia Denicia y Ramírez Castillo 2009)

En la industria láctea, la variabilidad del volumen, caudales, pH, y sólidos suspendidos del efluente dificultan la elección de un régimen eficaz de tratamiento. Se han elaborado diversos protocolos que influyen notablemente en la economía de la planta productora y aumenta los costos de los tratamientos convencionales. (Farizoglu y Uzuner 2011) Para que el agua residual no sobrepase los límites permisibles marcados en la legislación del país.

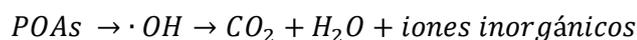
Entre los tratamientos más utilizados se encuentran procesos biológicos aeróbicos, en los cuales las bacterias usando oxígeno transforman o eliminan la materia orgánica disuelta. (Tirado Armesto et al. 2016) Se puede convertir los restos de SSV, DBO y DQO en biogás o biomasa.

(López y Harnisth 2016) Uno de los tratamientos más eficientes es la electrocoagulación que genera un estímulo de corriente eléctrica para desestabilizar las sustancias contaminantes, en sus

diferentes formas como emulsiones, disoluciones o suspensiones. Se realiza mediante de un equipo compuesto por un reactor de placas y reactores metálicos. (Sáenz 2018). Que elimina un alto porcentaje de la carga de DQO, DBO<sub>5</sub> y SS. El método Foto-fenton según (Programa Consolider Tragua 2010, pp.5-36) tiene la capacidad de remover los contaminantes mencionados en menor tiempo.

### 1.3. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Se basan en procesos físico-químicos que permiten la formación de especies transitorias in situ con gran poder oxidativos como el radical hidroxilo, el cual puede obtenerse con más facilidad por la influencia fotoquímica de manera natural con radiación solar o con una fuente artificial con luz ultravioleta (lámparas de mercurio). Varios estudios han confirmado su alto poder para transformar u oxidar contaminantes especialmente, de origen orgánico. (Silva et al. 2009) Se representa mediante la siguiente reacción (Calderon y Olortico 2019) :



Uno de los objetivos primordiales es la mineralización de contaminantes orgánicos evitando la formación de subproductos y residuos, su transformación en nuevos compuestos biodegradables, la eliminación de color y olor, y la desinfección. (Jurado 2009)

Los POA poseen dos clasificaciones en procesos fotoquímicos y no fotoquímicos (Tabla 1-2). Los procesos fotoquímicos requieren irradiación generalmente de luz UV (según el espectro electromagnético mostrado en la Figura 1-1); mientras que los no fotoquímicos se dan sin este requerimiento. Es importante mencionar que la ausencia de foto-irradiación no implica la ausencia de una fuente de energía (por ejemplo, electricidad). (Yamal 2013)

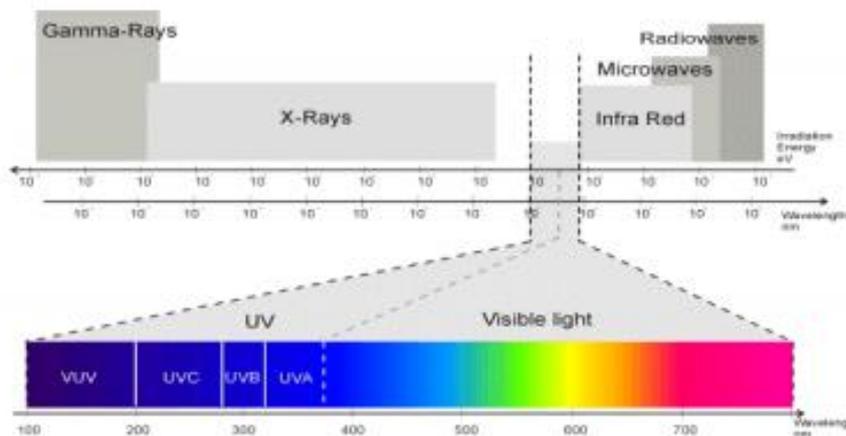
**Tabla 2-1:** Clasificación de los procesos de oxidación avanzada

No Fotoquímico	Fotoquímico
Radiólisis $\gamma$	Oxidación subcrítica y supercrítica del agua.
Oxidación electroquímica	Fotólisis ( $\lambda = 254 \text{ nm}$ )
Plasma no térmico	Fotólisis del agua en ultravioleta al vacío (VUV)

Ozonización con peróxido de hidrógeno	UV / peróxido de hidrógeno
Ozonización	UV / ozonización
Fenton y afines	Foto-Fenton y afines
Descarga electrohidráulica – ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

Fuente: Turbay, 2013.

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019



**Figura 1-1:** Espectro electromagnético

Fuente: (Turbay, 2013)

### 1.3.1. *Proceso Fenton y Foto-fenton*

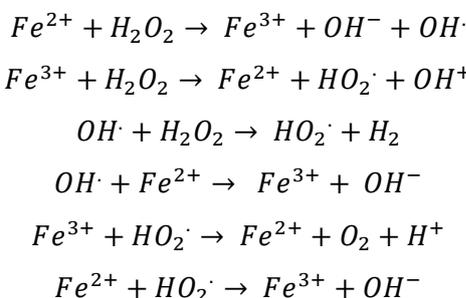
El (Programa Consolider Tragua 2010) lo considera un tratamiento destacado en oxidación avanzada por la eficiencia y efectividad que posee. El método Fenton es un proceso no fotoquímico contrario a Foto fenton, el cual demanda energía mediante la irradiación UV para su ejecución, ambos se complementan y alcanzan mayores niveles de remoción de contaminantes.

A partir de 1990, el método Fenton se convirtió en uno de los POA más analizados y aplicados con el fin de tratar aguas residuales. Según (Méndez, Roger Ivan et al. 2010) se trata de uno de los tratamientos físico-químicos más prometedores, el cual procede mediante la adición peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso. El sulfato ferroso es denominado “reactivo fenton”. Las condiciones necesarias del proceso se obtienen a temperatura de 20 a 40 grados centígrados, medio ácido y presión atmosférica.

Según (Kitis et ál., 1999; Yoo et ál., 2001; Lu et ál., 2001) citados por (Méndez, Roger Ivan et al. 2010) El agente responsable de la oxidación es el  $\text{OH}^-$ , este se forma en condiciones ácidas por la descomposición de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

La transformación estructural de los compuestos de una forma no selectiva, de manera parcial o total en sustancias inocuas, en condiciones adecuadas se logra una mineralización que da como productos  $\text{CO}_2$ , agua y ácidos orgánicos por lo que es posible su descarga sin tratamientos posteriores.

(Calderon y Olortico 2019) sostiene que las reacciones que conforman el proceso fenton son las siguientes:



**Tabla 3-1:** Principales reacciones descritas en el proceso Fenton

Reacción	$k(\text{M}^{-1}\text{s}^{-1})$	Referencia
$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \cdot\text{OH}$	76,00	Wailing (1975)
$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \cdot\text{OOH}$	0,01	Wailing (1975)
$\text{Fe}^{2+} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$	$3,2 \times 10^8$	Stuglik y Zagorski (1981); Buxton et al. (1988)
$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \cdot\text{OOH} + \text{H}_2\text{O}$	$2,7 \times 10^7$	Buxton et al. (1988); Christensen et al. (1982)
$\cdot\text{OOH} \rightarrow \text{O}_2\cdot + \text{H}^+$	$1,58 \times 10^5$	Bielski et al. (1985)
$\text{O}_2\cdot + \text{H}^+ \rightarrow \cdot\text{OOH}$	$1,00 \times 10^{10}$	Bielski et al. (1985)
$\text{Fe}^{2+} + \cdot\text{OOH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2$	$1,20 \times 10^6$	Jayson et al. (1969); Rush y Bielski (1985)
$\text{Fe}^{3+} + \cdot\text{OOH} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}^+ + \text{O}^2$	$3,10 \times 10^5$	Rush y Bielski (1985)
$\cdot\text{OH} + \cdot\text{OOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$1,00 \times 10^{10}$	Sehested et al. (1969)
$\cdot\text{OH} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$4,29 \times 10^9$	Sehested et al. (1969)
$\cdot\text{OOH} + \cdot\text{OOH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$8,23 \times 10^5$	Bielski et al. (1985)
$\text{Fe}^{3+} + \text{O}_2\cdot \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2$	$5,00 \times 10^7$	Rothschild y Allen (1958)
$\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2\cdot + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2$	$1,00 \times 10^7$	Rush y Bielski (1985)
$\cdot\text{OH} + \text{O}_2\cdot \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}^-$	$1,00 \times 10^{10}$	Sehested et al. (1969)
$\cdot\text{OOH} + \text{O}_2\cdot + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$9,70 \times 10^7$	Bielski et al. (1985)

$RH + \bullet OH \rightarrow R\bullet + H_2O$		Beltrán de Heredia et al. (2001)
$R\bullet + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow RH + Fe^{3+}$		Beltrán de Heredia et al. (2001)
$R\bullet + R\bullet \rightarrow R-R$		Beltrán de Heredia et al. (2001)
$R\bullet + Fe^{3+} \rightarrow R^+ + Fe^{2+}$		Beltrán de Heredia et al. (2001)

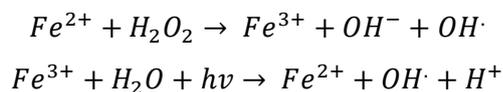
Fuente: Programa Consolider Tragua, 2010.

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

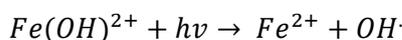
Hace aproximadamente dos décadas, se comprobó que el uso de irradiación UV visible en los sistemas Fenton aceleraba fuertemente la tasa de degradabilidad de diversos contaminantes. (Machulek et al. 2012) Esto es consecuencia de que la producción de radicales hidroxilo aumenta notablemente gracias a este factor. Este proceso fue llamado Foto-fenton o Fenton mejorado. (Pignatello 1992)

El proceso Foto-fenton es de los más significativos por su eficiencia para la degradación oxidativa de gran cantidad de compuestos orgánicos contaminantes en sistemas acuosos, se encuentra entre los pocos métodos que se aplican realmente a escala técnica para un pre tratamiento abiótico de aguas residuales industriales. (García, Braun y Oliveros 2015)

Se convierte en catalítico cuando el  $Fe^{2+}$  se oxida a  $Fe^{3+}$ , que se reduce de nuevo a  $Fe^{2+}$  por acción de la radiación. (Silva et al. 2009)



Diversas investigaciones de fotoquímica de  $Fe(OH)^{2+}$  han confirmado que este compuesto sufre una fotorreacción relativamente eficiente para producir  $Fe^{2+}$  y el radical hidroxilo (Machulek et al. 2012):



Estos métodos son reconocidos de manera amplia como latentemente eficientes, convenientes y económicos en el tratamiento de efluentes debido a las características inofensivas, económicas, de fácil manejo y amigables con el medio ambiente. (Pignatello, Oliveros y MacKay 2006)

Las condiciones de operación según (Almeida 2011), a las que se dio de forma más eficiente el proceso de Foto-fenton son las siguientes: pH 3,5; Temperatura a 30 ° C; reactivo de Fenton

(35,00 g H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 3,60 g Fe<sup>2+</sup>) y potencia de radiación ultravioleta de 28 W, tiempo de reacción de 60 minutos. Los resultados obtenidos expusieron porcentajes de reducción de COT 94 y 97%, DQO 97%, DBO 83%.

Hernández (2017), estudió la correlación entre la luz UV y la concentración de bacterias en muestras de efluentes residuales, los resultados mostraron disminución de la especie *E. coli* entre 80 y 99,5% con luz UV de 30 y 120 W/m<sup>2</sup> respectivamente, coliformes y enterobacterias disminuyeron en 58,0 y 99,8% con igual intensidad de luz.

En la Tabla 4-1 mostrada a continuación se indica una breve revisión a cerca de las principales aplicaciones y resultados del método fenton y fenton mejorado para el tratamiento de distintas fuentes de aguas residuales industriales.

**Tabla 4-1:** Revisión de la aplicación y principales resultados del método Fenton y Foto-fenton

Tipo de agua residual	Referencias	Resultados
Textil o teñido	Pérez et al. (2002a) Torrades et al. (2004) Amat et al. (2004) Liu et al. (2007)	Tratamiento exitoso de colorantes textiles y tensoactivos comerciales.
Industria del papel	Pérez et al. (2002b) Torrades et al. (2003)	Degradación exitosa del contenido orgánico de un efluente blanqueador de fábrica de pasta Kraft.
Industria petrolera	Ahmadi et al. (2005) Rizzo et al. (2008a) Lucas and Peres (2009) Dogruel et al. (2009)	Utilizado con éxito para eliminar contaminantes orgánicos.
	Gernjak et al. (2003, 2004)	Foto-fenton es un método prometedor y rentable para tratar efluentes provenientes de la industria petrolera.
Lixiviados	Lopez et al. (2004) Kang and Hwang (2000) Surmacz-Gorska (2001) Gotvajn et al. (2009)	Eficiencia de eliminación de DQO de 60% a 86% para lixiviados de vertederos maduros, altamente contaminados y lixiviados previamente tratados biológicamente.
Industria del vino	Guedes et al. (2003) Beltrán et al. (2004)	79% y 87% de eliminación de DQO. La relación de biodegradabilidad aumentó de 0,27 a 0,63.
Industria petroquímica	Millioli et al. (2003)	Eliminación y oxidación del petróleo derramado en la playa en la Bahía de Guanabara en Río de Janeiro

Industria farmacéutica	Zhang et al. (2006)	Se mejora la degradación de los compuestos orgánicos antes de la ósmosis inversa en dos etapas sistema (eliminación de COT del 38,00%). Eliminación de COT. La eficiencia puede ser de hasta el 99,70%.
	Yang et al. (2009)	Condiciones óptimas: potencia de microondas 300 W, tiempo de radiación 6 min, pH inicial 4,42, dosis de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 1300,00 mg / L y Fe <sup>2+</sup> (SO <sub>4</sub> ) 34900,00 mg / L. La eliminación de DQO fue 57,53%, eliminación de COT > 40%, degradación de 55,06%. La reacción tipo Fenton mejorada con microondas tuvo una eficacia de tratamiento superior.
	San Sebastián Martínez et al. (2003)	55% de eliminación de DQO después de 10 minutos a 3,00 M H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 0,30 M Fe <sup>2+</sup> , 40 ° C

Fuente: Yamal, 2013

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

#### 1.3.1.1. Desinfección con luz UV

La luz ultravioleta (UV) es un factor potencial para la desinfección de efluentes con altas cargas orgánicas. Actualmente el compuesto más utilizado es el cloro por la facilidad de manipulación, aplicación y bajo costo, pero genera productos secundarios denominados organoclorados y trihalometanos que se consideran carcinógenos. La luz ultravioleta (UV) posee las propiedades para disminuir o eliminar los organismos patógenos sin generar subproductos y manteniendo las características del agua tratada. (CONAGUA 2011)

Entre los parámetros que determinan la eficiencia de la desinfección por luz UV se encuentran la carga contaminante del agua a tratar, la intensidad de la luz, el tiempo de contacto y la velocidad del flujo. Es importante determinar la carga contaminante antes de iniciar el procedimiento ya que, considerando la carga contaminante, los métodos van a depender del tipo y cantidad de material orgánico, es decir, microorganismos del efluente (entre 10<sup>4</sup> o 10<sup>5</sup> UFC/100 mL de coliformes fecales). (Beltrán y Jiménez 2000)

- Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta (UV) corresponde a las longitudes de onda entre 400 y 100 nm del espectro electromagnético. El cual va desde el espectro visible (parte violeta) y termina en los rayos X blandos. (Portero 2016)

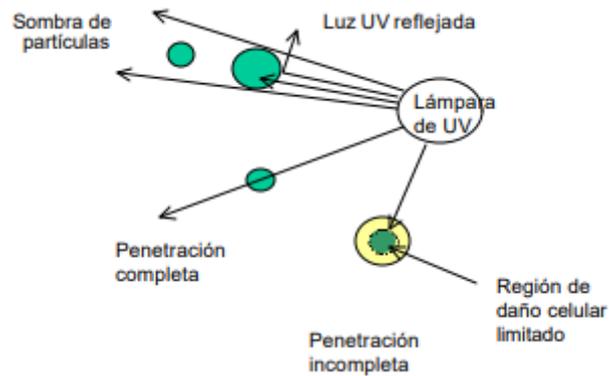
La radiación UV acelera la reacción de reducción del  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  lo que genera mayor producción de radicales  $\text{OH}\cdot$  y por ende la degradación de materia orgánica. Esto se produce mediante la fotólisis directa del peróxido de hidrógeno y otras fotólisis de las sustancias contaminantes que son susceptibles a ser fotodegradadas. (Litter [sin fecha])

El efecto germicida permite destruir el ácido desoxirribonucleico y ácido ribonucleico, ADN y ARN, de los microorganismos del agua residual que generalmente son patógenos y generan contaminación. De este modo la información genética de las células queda completamente dañada y los procesos de reproducción y funcionamiento de las células se apagan y el microorganismo se inactiva. Aunque existe la posibilidad de una fotoreactivación, es decir, que la célula sane, los estudios demuestran una muy baja posibilidad de esto. (CONAGUA 2011) Por lo que, el alto porcentaje de remoción de contaminantes biológicos, lo hace un proceso muy efectivo para el tratamiento.

- Efecto de la radiación UV en las partículas

La gran mayoría de microorganismos al estar en contacto con otras sustancias son adsorbidos o incorporados a otro tipo de partículas. Para mejorar la eficiencia del proceso es necesario conocer el comportamiento de la luz UV con relación a las partículas, como se indica en la Figura 2-1. La eficiencia de remoción aumenta mientras disminuye el contenido de sólidos suspendidos y aumenta la superficie de contacto de la luz UV. (Beltrán y Jiménez 2000).

El material coloidal puede absorber o reflejar la luz, evitando de esta manera que los microorganismos sean totalmente penetrados y destruidos. (CONAGUA 2011)



**Figura 2-1:** Comportamiento de las partículas y la luz UV

Fuente: (Beltrán, N; Jiménez, B, 2000)

#### 2.1.1.1. *Parámetros que influyen en el proceso*

- Potencial de hidrógeno

Según (Guarquila 2013), cuando el pH está entre 2,5 y 2,8 la velocidad de reacción es máxima, es decir que todas las reacciones suceden con más eficiencia. Varios autores mencionan que las mejores condiciones se dieron a pH cercano a 2,8. El pH se relaciona con la oxidación del catalizador para que pueda producir los radicales necesarios. (Programa Consolider Tragua 2010)

- Relación Fe(II)/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

La eficiencia del proceso Fenton se ve directamente relacionada con la concentración del peróxido de hidrógeno, y su cinética se ve influida por la cantidad de hierro. (Pignatello, Oliveros y MacKay 2006). Para la descomposición del peróxido de hidrógeno en radicales hidroxilo se necesita una alta concentración de hierro. A mayor concentración de los reactivos, catalizador y el oxidante, resultará mayor la velocidad de oxidación. No obstante, la formación de reacciones secundarias que limitan la degradación del contaminante, se producen cuando las cantidades de reactivo superan la cantidad requerida. (Rubio-Clemente, Chica y Peñuela 2014)

- Temperatura

La reacción Fenton requiere la absorción de energía en forma de calor, es decir, es endotérmica. A medida que se da el incremento de temperatura, también aumenta la velocidad de reacción de oxidación. El rango recomendable de operación es 25 - 45 °C. (Terán 2016). Por este motivo se puede trabajar de manera exitosa a temperatura ambiente, sin embargo, algunos compuestos contaminantes requieren mayores temperaturas para su remoción.

- Agitación

El radical  $\bullet\text{OH}$ , reacciona con los compuestos orgánicos a través de un mecanismo controlado por la difusión. Por lo tanto, una fuerte agitación puede aumentar la velocidad de reacción de radicales hidroxilo y acelerar la degradación de contaminantes. (Domènech, Litter y Jardim 2004)

- Concentración de iones inorgánicos

Ciertos aniones inorgánicos como fluoruros, sulfatos, bromuros y cloruros actúan como inhibidores de la acción de los radicales  $\bullet\text{OH}$  o forman nuevos compuestos incapaces de reaccionar con el hierro. (Menéndez 2018)

- Lámparas UVc

Lámparas de radiación ultravioleta que emiten una longitud de onda de 200 a 280 nm que actúa efectivamente como bactericida, por lo que son utilizadas para la esterilización y tratamiento de distintas superficies y ambientes, como el agua residual. Además, el UV-C ioniza los gases de la atmósfera, esto ayuda en la creación y mantenimiento de la capa de ozono. (Portero 2016)

- Potencia lumínica

Cantidad de energía que consume una lámpara, se obtiene dividiendo la energía entre el tiempo requerido para su total consumo, se expresa en Watts. (Mediatrader 2007). Determina la eficiencia de las lámparas UV para la fotocatalisis del proceso fenton.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

#### 2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Por el método de investigación cuantitativa, según el objetivo aplicada, según el nivel de profundización en el objeto de estudio explicativa, según la manipulación de variables experimental, según el tipo de inferencia hipotética-deductiva, según el periodo temporal longitudinal.

#### 2.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.2.1. *Diseño Experimental / Cuasi Experimental / Pre Experimental*

Experimental.

##### 2.2.1.1. *Identificación de variables*

- Variable dependiente: Eficiencia de remoción de contaminantes.
- Variables independientes: Concentración  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ , Potencia lumínica y Tiempo.

##### 2.2.1.2. *Planteamiento de hipótesis*

El método Foto-fenton a mayor potencia es el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.

2.2.1.3. Matriz de consistencia

**Tabla 5-2:** Matriz de consistencia

<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables</b>
<p><b>Problema general:</b></p> <p>Las aguas residuales provenientes de la industria láctea generan contaminación en los recursos hídricos afectando las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua.</p>	<p><b>Objetivo general:</b></p> <p>Evaluar la eficiencia de Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.</p> <p><b>Objetivos específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar los parámetros óptimos de operación del proceso Foto-fenton.</li> <li>• Aplicar la metodología de Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.</li> <li>• Analizar las variaciones de la carga contaminante de las aguas residuales provenientes de la industria láctea antes de después de aplicar el método Foto-fenton.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis general:</b></p> <p>El método Foto-fenton a mayor potencia es el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.</p>	<p><b>Variables independientes:</b></p> <p>Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Potencia lumínica. Tiempo de contacto</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbidez</li> <li>• DQO</li> <li>• Potencia de las lámparas UV</li> </ul> <p><b>Variable dependiente:</b></p> <p>Eficiencia de la remoción de contaminantes.</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % remoción DBO</li> <li>• % remoción DQO</li> <li>• % remoción SS</li> <li>• % remoción Turbidez</li> <li>• % remoción Coliformes fecales</li> </ul>

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

#### 2.2.1.4. Operacionalización de las variables

**Tabla 6-2:** Operacionalización de variables

Variable	Concepto	Indicador	Instrumento
<b>Variables independientes:</b>  Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Reacción fenton: Concentración de los iones de hierro y peróxido de hidrógeno óptimos para la reducción de contaminantes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbidez</li> <li>• DQO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipo de agitación múltiple</li> <li>• Turbidímetro</li> <li>• Potenciómetro</li> </ul>
Potencia lumínica	Cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microorganismos (coliformes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estufa</li> <li>• Placas</li> </ul>
Tiempo de contacto	Lapso de tiempo en el que el agua residual está en contacto con la luz UV		
<b>Variable dependiente:</b>  Eficiencia de remoción de contaminantes.	Porcentaje de remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales lácteas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % remoción DBO</li> <li>• % remoción DQO</li> <li>• % remoción SS</li> <li>• % remoción Turbidez</li> <li>• % remoción Coliformes fecales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Botellas ámbar</li> <li>• Digestor de DQO</li> <li>• Digestor de DBO</li> <li>• Espectrofotómetro</li> <li>• Turbidímetro</li> <li>• Estufa</li> </ul>

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

#### 2.2.1.5. Localización del área de Estudio

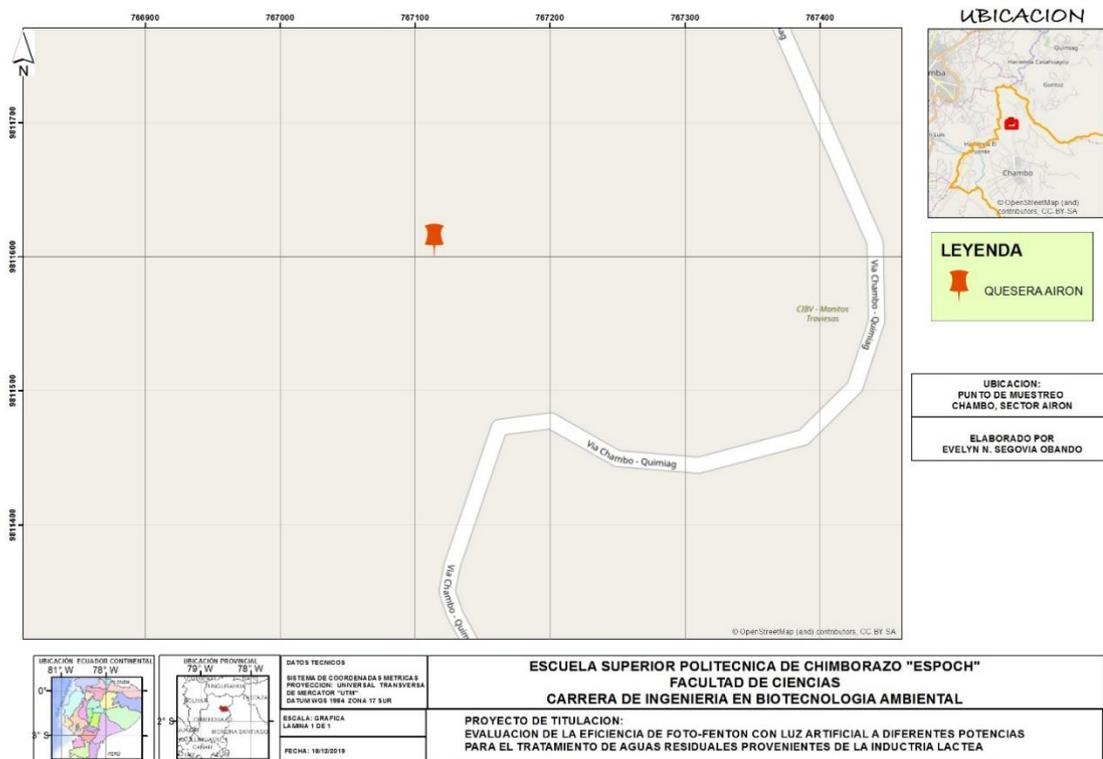
El muestreo se llevó a cabo en la Quesera “Airón” ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón Chambo, barrio Santo Cristo. El clima de la zona es cálido-templado la temperatura es de 14°C con precipitaciones media de 674 mm.

El levantamiento de información fue realizado mediante el Sistema de Coordenadas Métricas, Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), Datum WGS 1984 Zona 17 Sur.

**Tabla 7-2:** Ubicación geográfica de la quesera “Airón”

Coordenadas	
X	Y
767114,32	9811612,17

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019



**Figura 3-2:** Mapa de ubicación de la quesera “Airón”

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

La aplicación y estudio se desarrollaron en el laboratorio de Calidad del Agua en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias ubicado en la provincia de Chimborazo,

cantón Riobamba, Panamericana Sur km 1/2. El clima de la zona es cálido-templado con una temperatura promedio de 14.0°C y precipitación media aproximada de 561 mm.

**Tabla 8-2:** Ubicación geográfica del laboratorio de Calidad del Agua - ESPOCH

Coordenadas	
X	Y
758254,52	981689,80

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

#### 2.2.1.6. Población de estudio

Se analizaron las aguas residuales provenientes de la Quesera “Airón”.

#### 2.2.1.7. Tamaño de la muestra

Se tomaron 4,50 litros de agua residual proveniente de la Quesera “Airón” para la caracterización inicial. Se tomaron 6,00 litros de agua cada tres días durante seis semanas para el tratamiento.

#### 2.2.1.8. Método de muestreo

Se realizó un muestreo simple.

Se tomaron 4,00 litros de agua residual de forma manual, en dos botellas de vidrio de 1,00 y 3,00 litros para los respectivos análisis de laboratorio. Para los análisis microbiológicos se tomaron 2 muestras de 0,25 litros en frascos estériles.

Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 4°C y se almacenaron protegiendo de los rayos solares. En un período de 1 hora fueron entregadas a los laboratorios para los respectivos análisis.

## **2.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

### **2.3.1. *Materiales, equipos y reactivos***

#### **2.3.1.1. *Materiales***

- Balón de aforo 100 mL
- Balón de aforo 50 mL
- 8 Vasos de precipitación de 1000 mL
- Varilla de agitación
- Pipetas de plástico esterilizadas
- 4 Pipetas de vidrio de 10 mL
- 2 Vasos de precipitación de 100 mL

#### **2.3.1.2. *Equipos***

- Balanza analítica
- Equipo de agitación múltiple
- Turbidímetro
- Potenciómetro
- Digestor de DQO
- Digestor de DBO
- Conductímetro
- Fotoreactor

Reactor UV:

- Lámparas UV de 10 watts
- Lámpara UV de 20 watts
- Lámpara UV de 40 watts
- 1 Tubo PVC de 82 cm. con diámetro de 3 pulgadas
- 2 Te PVC de 3 pulgadas
- 4 Reductores PVC de 3 pulgadas a 2 pulgadas

- 4 Empaques de caucho de 2 pulgadas a 1.5 pulgadas
- 2 Bushing de 1 pulgada a  $\frac{3}{4}$  de pulgada
- 2 Neplos corridos de  $\frac{1}{2}$  pulgada
- 2 Llaves de paso esféricas  $\frac{1}{2}$  pulgada
- 1 Lámpara fluorescente de luz UV
- 2 Conectores de lámpara fluorescente
- 2 Metros de cable sólido número 18
- 1 Balastro
- 3 Metros de cable gemelo número 16
- 1 Silicón
- 1 frasco de pegamento Pegatubo
- 1 Taipe
- 1 Teflón
- Papel periódico
- Fósforos

#### *2.3.1.3. Reactivos*

- Sulfato ferroso puro ( $\text{FeSO}_4$ )
- Peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) al 30%
- Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1N
- Agua destilada
- Agua residual láctea

#### *2.3.2. Métodos y técnicas*

##### *2.3.2.1. Caracterización del agua residual*

La caracterización para los análisis físico-químicos y biológicos de las aguas residuales se llevó a cabo en dos laboratorios:

- Laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo: Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF,

STANDARD METHODS 21° EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 21° EDICIÓN.

- Laboratorio de Servicios Analíticos, Químicos y Microbiológicos AQMIC: Métodos Normalizados APA, AWWA, WPCF.

**Tabla 9-2:** Métodos usados por Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH

Parámetros	Método/Norma
Turbiedad	STANDARD METHODS 2130 B
Sólidos Suspendidos	STANDARD METHODS 2540 D
DBO <sub>5</sub>	STANDARD METHODS 5210 – B
DQO	STANDARD METHODS 5220 – D mod
Coliformes Totales	STANDARD METHODS 9221 C
Coliformes fecales	STANDARD METHODS 9221 C

Fuente: Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH

**Tabla 10-2:** Métodos usados por Laboratorio AQMIC

Parámetros	Método/Norma (Métodos Normalizados APA, AWWA, WPCF)
Turbiedad	STANDARD METHODS 2130 B
Sólidos Suspendidos	STANDARD METHODS 2540 D
DBO <sub>5</sub>	STANDARD METHODS 5210 – B
DQO	STANDARD METHODS 5220 – D mod
Coliformes Totales	STANDARD METHODS 9221 C
Coliformes fecales	STANDARD METHODS 9221 C

Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos AQMIC

### 2.3.1.1. Aplicación del método Fenton

- Preparación de la solución madre

La solución madre se preparó a partir de Sulfato Ferroso puro (FeSO<sub>4</sub>)

Se pesó 10 g de FeSO<sub>4</sub> y se aforó con agua destilada en un balón de 100 mL. Se realizaron los siguientes cálculos:

$$\frac{10g \text{ FeSO}_4}{100 \text{ mL agua destilada}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 100000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ FeSO}_4$$

**Ecuación 1-1:** Solución de reserva

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$C_2 = \frac{C_1 * V_1}{V_2}$$

$$C_2 = \frac{100000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} (\text{FeSO}_4) * 1 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}}$$

$$C_2 = 100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

- 1 mL de solución de FeSO<sub>4</sub> contiene 100 mg/L (ppm)
- b) Concentración óptima de Hierro y Peróxido de Hidrógeno
- Se realizaron 13 tratamientos a los cuales se les adicionó las cantidades presentadas en la tabla 14-3. El Fe<sup>2+</sup> varía en el rango de 100,00 (mg/L) a 500,00, (mg/L) y el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> varía de 4500,00 (mg/L) a 9000,00 (mg/L). El hierro fue preparado a partir de una solución de 1% de concentración de Sulfato ferroso y el Peróxido de hidrógeno a partir de una concentración al 30%.
  - Los ensayos se prepararon en vasos de precipitación de 1000,00 mL volumen, se midió los valores iniciales de pH, conductividad, DQO y turbidez.
  - Se realizó una mezcla rápida a 300 rpm pasados 10 minutos se disminuyó la velocidad de agitación a 100 rpm durante 20 minutos.
  - Pasadas 72 horas se mide y registra la turbidez.
  - A las muestras que presentan menor turbidez se les mide la DQO.
  - La dosis adecuada será aquella que registre el menor valor de estos dos parámetros.
  - Hallada la dosis óptima se realizaron tres réplicas y se midió la turbidez y la DQO.
- c) Ajuste de pH

- Se realizaron 4 ensayos en vasos de precipitación de 1000,00 mL con el mismo volumen de muestra y se adicionó la concentración óptima obtenida de  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ .
- Se agregó ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 1 N para obtener los pH de 2,00, 2,50, 3,00 y 3,50 en cada muestra, se agitó a 300 rpm durante 10 minutos, se disminuyó la velocidad de agitación a 100 rpm durante 20 minutos y se dejó en reposo durante 72 horas.
- La turbidez fue registrada antes y después del procedimiento, el pH óptimo fue el que registró menor valor de turbidez.

### 2.3.1.2. Construcción de los reactores UV

#### a) Conexiones para las lámparas

- Los lados del tubo PVC se calentaron con periódico encendido para conectarlos a las Te PVC; uno a cada lado.
- El otro lado de las Te PVC se conectaron a los reductores PVC (en el borde de 3”).
- Se insertó la Lámpara UV en el tubo PV (los lados de la lámpara sobresalen a cada lado, en los reductores).
- Se insertaron los empaques en los lados de la lámpara y se aseguraron con los reductores.
- Se utilizó pegamento para unir los tubos PVC se realizaron con pegamento; y silicona para unir los tubos con los empaques.

#### b) Conexiones para las llaves de ingreso de agua residual y salida de agua tratada

- Las Te PVC, en la entrada intermedia, se conectaron con los reductores (en el borde de 3”).
- Las Te PVC, (en el borde de 2”) se conectaron con los empaques.
- Los Bushing se colocaron dentro de los empaques.
- Los neplos corridos, en el un borde, se conectaron con los bushing.
- Los neplos corridos, en el segundo borde, se conectaron con las llaves.
- Las uniones de los tubos e implementos PVC se realizaron con pegamento; las uniones de los tubos con los empaques se realizan con silicón; la conexión de la llave de realizó con teflón.

#### c) Conexiones eléctricas

- Los terminales de la lámpara, ubicadas en los dos lados, se conectaron con los conectores.
- Los conectores se conectaron al balastro por medio de los cables sólidos.
- El Balastro se conectó a la red eléctrica por medio del cable gemelo con un enchufe común.
- Las conexiones se aseguraron con taípe.



**Figura 4-2:** Reactor UV con lámpara de 40 watts

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

### 2.3.1.3. Aplicación del método Foto-fenton

#### a) Foto-fenton

Se realizaron tres muestras de 1000,00 mL del agua tratada con la concentración óptima de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$ . Fueron expuestas a luz UV mediante el uso de tres reactores de 10, 20 y 40 Watts y se consideró una muestra blanco.

- El agua se incorporó en los tres reactores UV de manera simultánea, pasado el tiempo de contacto se determinó el material biológico y su porcentaje de remoción.
- #### b) Determinación del tiempo de contacto
- A los 15, 30, 45 y 60 minutos de iniciado el proceso Foto-fenton, se determinó la carga de microorganismos.

- El valor óptimo corresponde al tiempo mínimo requerido para obtener el mayor porcentaje de remoción en cada una de las lámparas.

#### 2.3.1.4. Análisis de la eficiencia de remoción de los contaminantes

Para determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes se aplicó la siguiente fórmula (Malacatus, Chamorro y Orellana 2016):

$$\%E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$$

En dónde;

$E$ : Eficencia (%)

$S_0$ : Concentración del contaminante antes de ser tratado (mg/L)

$S$ : Concentración del contaminante después del tratamiento (mg/L)

Los parámetros denominados “contaminantes” fueron: turbidez, sólidos suspendidos, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y coliformes fecales. El cálculo de la eficiencia permitió conocer su porcentaje de remoción en las aguas residuales.

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL LÁCTEA

**Tabla 11-3:** Resultados de análisis del Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH para el análisis físico-químico y biológico de las aguas residuales

Parámetros	Unidades	Resultados	U(K=2)
Turbiedad	FTU – NTU	327,00	N/A
Sólidos Suspendidos	mg/L	653,00	N/A
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	4230,00	N/A
DQO	mg/L	7950,00	+/- 10 %
Coliformes Totales	UFC/100 MI	7100,00	N/A
Coliformes fecales	UFC/100 MI	1800,00	N/A

Fuente: Laboratorio de Servicios Ambientales UNACH

**Tabla 12-3:** Resultados de análisis del Laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos AQMIC

Parámetros	Unidades	Resultados
pH	-	5,80
Turbiedad	NTU	368,00
Sólidos Suspendidos	mg/L	660,00
DBO <sub>5</sub>	mg/L	4100,00
DQO	mg/L	5900,00
Coliformes Totales	UFC/100 mL	8,30 x10 <sup>6</sup>
Coliformes fecales	UFC/100 mL	2,40 x10 <sup>6</sup>

Fuente: Laboratorio de Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos AQMIC

Los valores del agua residual se encuentran fuera de los límites permisibles de calidad de agua para su vertido, sea al sistema de alcantarillado público o un cuerpo de agua dulce. Los parámetros más alarmantes son DQO y coliformes. Notablemente están causando un impacto negativo que hasta la actualidad no cuenta con tratabilidad.

El pH es el único parámetro que cumple la normativa de calidad de agua para su vertido ya que se encuentra en el rango aceptado.

Según (Cuvi 2017), en su estudio a cerca de aguas residuales lácteas en la ciudad de Quito, los resultados fueron los siguientes: DBO<sub>5</sub> 302,80 mg/L, DQO 16099,30 mg/L, pH 7.30, turbidez 1281,60 NTU. A nivel internacional, según (Tirado et al. 2016) en su comparación entre diversas investigaciones relevantes (Tabla 1-1), la caracterización de este tipo de agua residual es: DBO<sub>5</sub> 2300,00 mg/L – 12500,00 mg/L, DQO 3900,00 mg/L – 24813,00 mg/L, sólidos suspendidos 280,00 mg/L – 4848,00 mg/L, pH 4,70 – 6,80, turbidez 1744,00 NTU – 3921,00 NTU.

De acuerdo con (Herrera y Corpas 2013) las industrias lácteas generan aguas residuales con composiciones tan variadas como productos lácteos en el mercado, sería un error generalizar a cerca de la contaminación generada, que es distinta en cada industria.

Sin duda, aunque las aguas residuales provienen del mismo tipo de actividad siempre presentan variaciones debido a las condiciones ambientales, la cadena de producción, los materiales de limpieza e incluso la calidad de la materia prima. Por esta razón, es fundamental pasar por un proceso de optimización de condiciones cuando se aplica cualquier método de tratabilidad.

### 3.2. APLICACIÓN DEL MÉTODO FENTON

**Tabla 13-3:** Análisis de la muestra inicial

Parámetros	Unidades	Resultados
Turbidez	NTU	347,50
pH	-	5,68
Conductividad	Ms	3,30
DQO	mg/L	6925,00
Coliformes fecales	UFC/100mL	3560,00

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

### 3.2.1. Concentración Óptima de Hierro y Peróxido de hidrógeno

**Tabla 14-3:** Optimización del método Fenton

Tratamientos	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Turbidez (NTU)	Porcentaje de remoción de turbidez (%)	DQO (mg/L)	Porcentaje de remoción de DQO (%)
1	100,00	4500,00	34,20	90,16	-	-
2	200,00	5000,00	24,40	92,98	-	-
3	200,00	6000,00	22,60	93,72	2960,00	58,43
4	250,00	4080,00	3,30	99,05	-	-
5	285,00	6000,00	8,10	97,67	-	-
6	300,00	4500,00	8,70	97,58	2135,00	70,01
7	300,00	6000,00	2,90	99,19	1017,00	85,72
8	300,00	9000,00	29,30	91,56	3200,00	53,79
9	331,50	5537,00	2,40	99,31	556,00	91,97
10	400,00	5000,00	12,00	96,55	875,00	87,36
11	400,00	6000,00	19,70	94,52	1578,00	77,84
12	500,00	4500,00	26,50	92,37	1053,00	84,79
13	500,00	6000,00	68,50	80,29	-	-
Réplicas al mejor tratamiento						
9	331,50	5537,00	0,35	99,89	560,00	91,90
9	331,50	5537,00	0,18	99,95	495,00	92,85
9	331,50	5537,00	0,15	99,96	546,00	92,11

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

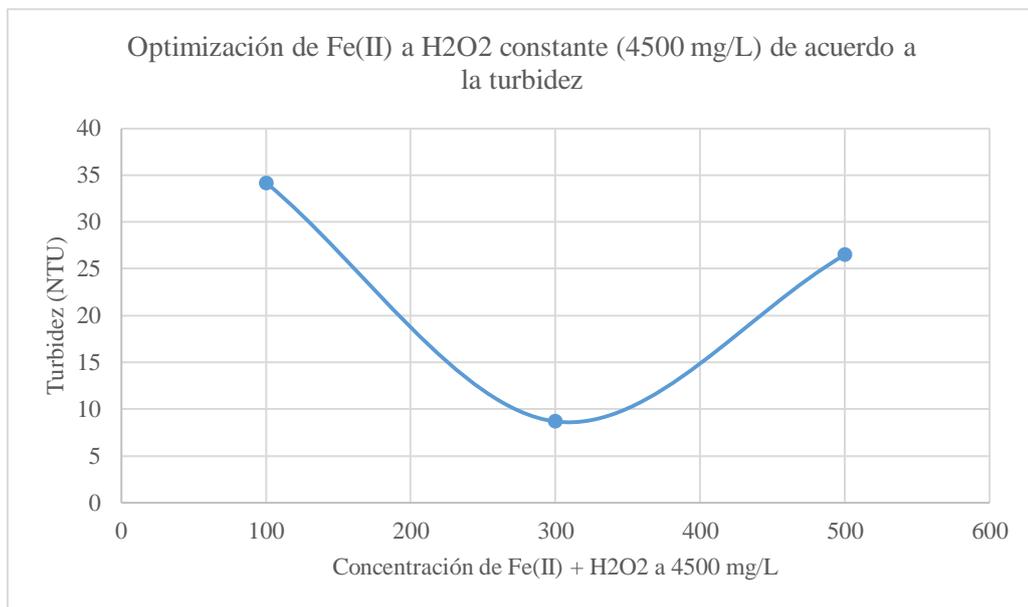
(Zazo Martínez 2004) en su trabajo de investigación menciona que el método fenton se lleva a cabo en condiciones ácidas, el pH óptimo es 3,00. Por otro lado, (Menéndez Escarcena 2018) fija este valor en 2,80. Debido a esto, todos los ensayos de la tabla 14-3 fueron acidificados a pH 3,00.

La concentración de Fe<sup>2+</sup> a 300,00 mg/L y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 6000,00 mg/L presenta mayor eficiencia por lo que el rango óptimo se encuentra cercano a estos valores, logrando una reducción del 99,19% de turbidez y 85,72% de DQO, los datos fueron analizados mediante gráficas para optimizar su concentración. Teniendo en cuenta a (Ibarra-Taquez, Dobrosz-Gómez y Gómez 2018) esta relación Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> provee una alta disposición de reactivos que en medio ácido y a temperatura

ambiental generan el radical hidroxilo que produce la precipitación del hierro y formación de especies activas que oxidan los contaminantes. Señalando esto, se sostiene que el tratamiento 9 es el óptimo para el método Fenton en aguas residuales provenientes de la industria láctea.

La relevancia de los resultados radica en la reducción de ambos parámetros analizados, turbidez y DQO. De todas formas, no es conveniente tomar uno de estos como indicador de calidad ya que la reducción de la turbidez no siempre indica que la DQO haya disminuido significativamente. Es necesario analizar ambos parámetros.

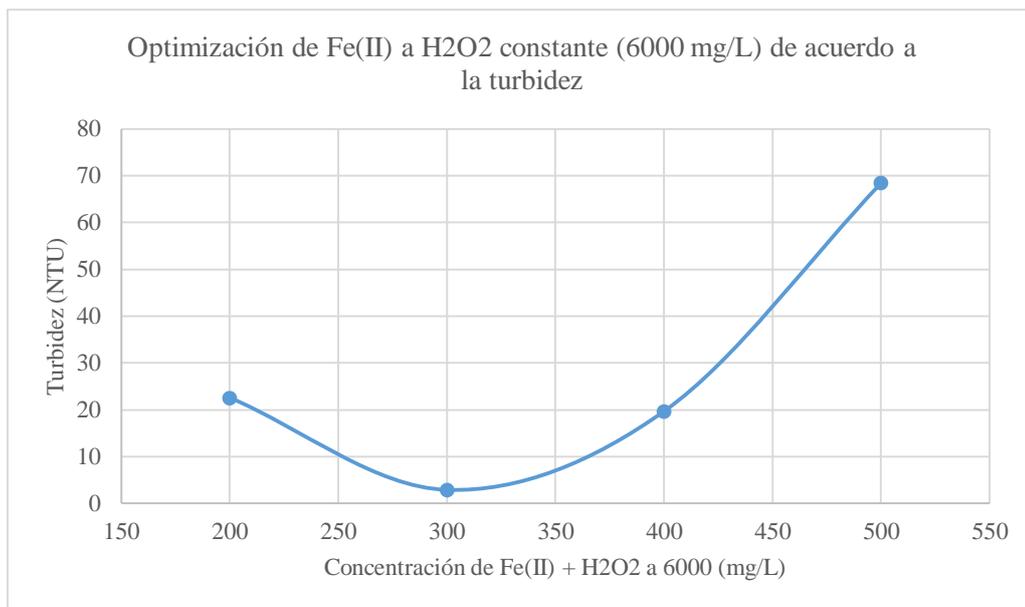
### 3.2.1.1. Concentración óptima de hierro



**Gráfico 1-3:** Variación de la turbidez a 4500 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Para la determinación de la concentración óptima de hierro, como se observa en el gráfico 1-3 se mantuvo una concentración constante de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 4500,00 mg/L variando la concentración de hierro de 100,00 a 500,00 mg/L. El valor más bajo de turbidez obtenida fue de 8,70 NTU aproximadamente a 300,00 mg/L. Al aumentar o disminuir esta concentración aumenta la turbidez.

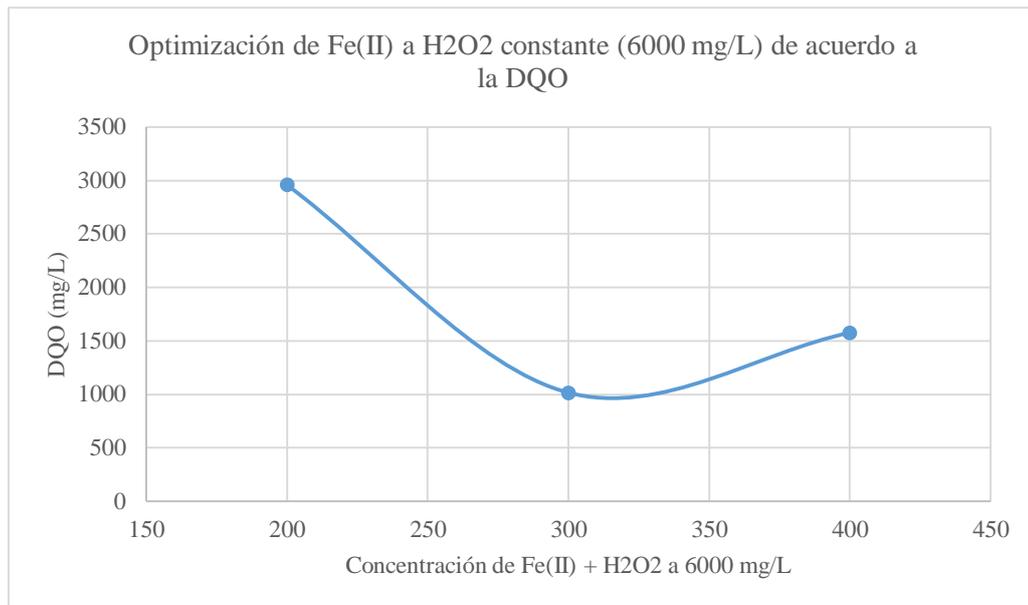


**Gráfico 2-3:** Variación de la turbidez a 6000 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

En el gráfico 2-3, se mantiene constante la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 6000,00 mg/L y se varía la concentración de hierro de 200,00 a 500,00 mg/L, obteniendo que la turbidez más baja es aproximadamente 300,00 mg/L.

Los gráficos 1-3 y 2-3 presentan orientaciones similares, el punto más cercano al eje x, es decir, el valor más bajo de turbidez se halla en la concentración óptima de hierro para el proceso fenton. El mejor resultado se dio a la concentración más alta de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por lo que el valor de 6000,00 mg/L (gráfico 2-3) se convierte en referente de la concentración óptima que posteriormente se determinará.



**Gráfico 3-3:** Variación de la DQO a 6000 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

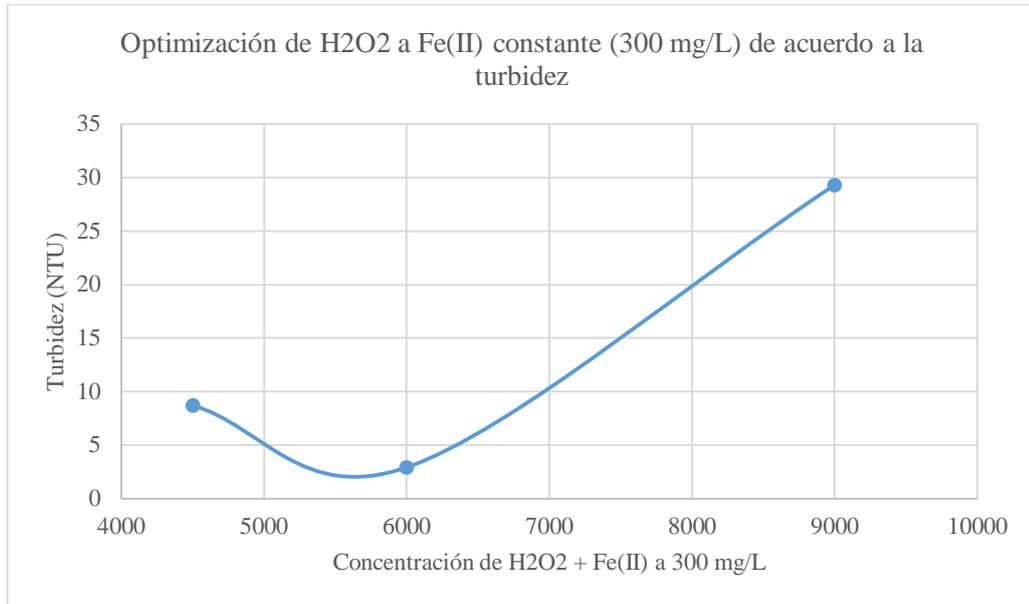
**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

Dado que a 6000,00 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se logró determinar los mejores resultados en cuanto a turbidez, se toma este valor como referente para hallar la concentración óptima de hierro variando su concentración de 200,00 a 400,00 mg/L y cuantificando la DQO.

El gráfico 3-3 muestra una curva similar a los gráficos 1-3 y 2-3, lo que indica que las condiciones óptimas del hierro para la remoción de DQO y turbidez son similares. Si analizamos los tres gráficos, encontramos que la concentración óptima para el hierro en el proceso fenton con relación a la turbidez y DQO es de aproximadamente 331,50 mg/L, este valor se encuentra en el punto más bajo de las curvas con relación al eje x.

Es importante destacar que, para ambos parámetros, turbidez y DQO, se optimiza una sola concentración de hierro debido a que la variación en las curvas es muy pequeña.

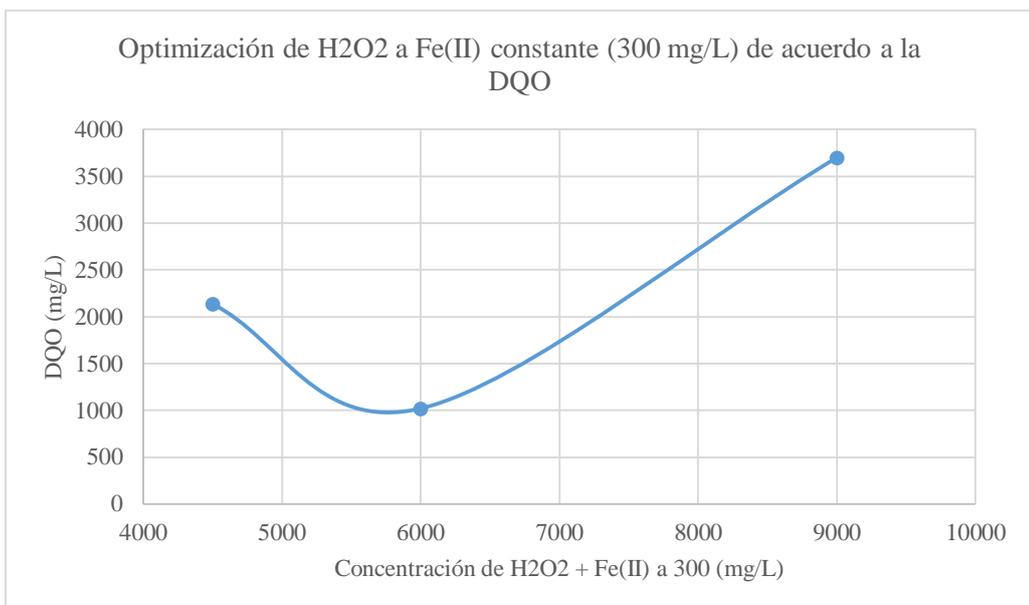
### 3.2.1.2. Concentración Óptima de peróxido de hidrógeno



**Gráfico 4-3:** Variación de la turbidez a 300 mg/L de Fe<sup>2+</sup>

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Para la determinación de la concentración óptima del peróxido de hidrógeno con relación a la turbidez, se mantiene constante el Fe<sup>2+</sup> a 300 mg/L variando la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 4500,00 a 9000,00 mg/L. El valor óptimo será aquel que muestre la menor concentración de turbidez, que como se observa en el gráfico 4-3 está entre 5000,00 y 6000,00 mg/L.



**Gráfico 5-3:** Variación de la DQO a 300 mg/L de Fe<sup>2+</sup>

Manteniendo constante la concentración de hierro a 300,00 mg/L, se varía la concentración de peróxido de 4500,00 a 9000,00 mg/L para determinar las condiciones que generen mayor reducción de la DQO, como se observa en el gráfico 5-3 la parte más cercana al eje x está entre 5000,00 y 6000,00 mg/L de peróxido. Similar a la obtenida en el gráfico 4-3 para la turbidez. Al analizar ambos gráficos se determina una concentración óptima de 5537,00 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la reducción de los dos parámetros analizados.

Previo a la optimización de los reactivos se logró el 99,19% de reducción de la turbidez y 87,36% de DQO en los tratamientos 7 y 10 respectivamente (tabla 14-3). Con la optimización de los reactivos, 331,50 mg/L de Fe<sup>2+</sup> y 5537,00 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aumentó la eficiencia de remoción a 99,78% de turbidez y 92,21% de DQO.

(Ruiz et al. [sin fecha]) en su estudio para tratamiento de aguas residuales lácteas en México encuentra concentraciones similares de los reactivos fenton, 300,00 mg/L Fe<sup>2+</sup> de y 4000,00 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sin embargo el porcentaje final de remoción es aproximadamente 30% menor que el presentado en la presente investigación.

La aplicación de fenton en diferentes industrias ha dado los siguientes resultados, en cuanto a optimización de reactivos: Residuos tóxicos provenientes de laboratorios 9,00 g/L de Fe<sup>2+</sup> y 220,70 g/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Ramos 2016). En la industria textil 80,0 mg/L Fe<sup>2+</sup> y 3,00 mmol/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Castro y Durán 2013). Lixiviados 200,0 mg/L de Fe<sup>2+</sup> y de 1000,00 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. (Méndez, Roger Ivan et al. 2010)

(Ibarra-Taquez, Dobrosz-Gómez y Gómez 2018) obtiene resultados similares para la remoción de DQO en la industria del café, con 500 mg/L de Fe<sup>2+</sup> y 6000,00 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> logra la reducción del 80,50% de DQO. Para la reducción máxima del color utiliza la misma concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pero el Fe<sup>2+</sup> varía a 285,00 mg/L. Es decir, fue necesario realizar optimizaciones por separado para reducir cada uno de los contaminantes. En la industria láctea se generalizó a una sola concentración óptima debido a que la turbidez y la DQO disminuyeron de manera similar con los reactivos optimizados (tratamiento 9). El color no fue necesario analizar debido a que el agua residual no presentaba un alto porcentaje en este parámetro, lo contrario sucedió con la turbidez, la cual tuvo un valor inicial notablemente alto, 347,50 NTU, debido a esto se consideró analizar su variación en todo el proceso. Como lo menciona (Goyenola 2007), existe una distinción entre

el color y la turbidez del agua, el color tiene relación a las sustancias disueltas o material en suspensión y la turbidez se relaciona a los materiales en suspensión que absorben la luz incidente. Las variaciones en los parámetros se deben a que las aguas residuales presentan diferentes características dependiendo de su origen, carga contaminante, factores climáticos, etc. Como lo menciona (Corpas y Fernando 2012) incluso si las aguas residuales tienen el mismo origen, como la industria láctea, sus características son variadas y por ende sus condiciones de tratabilidad serán distintas. Por este motivo que la optimización de parámetros tiene una importancia imprescindible para la aplicación del tratamiento.

### 3.2.1.3. Análisis de la turbidez en el método fenton



**Gráfico 6-3:** Análisis de la turbidez en el método fenton

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

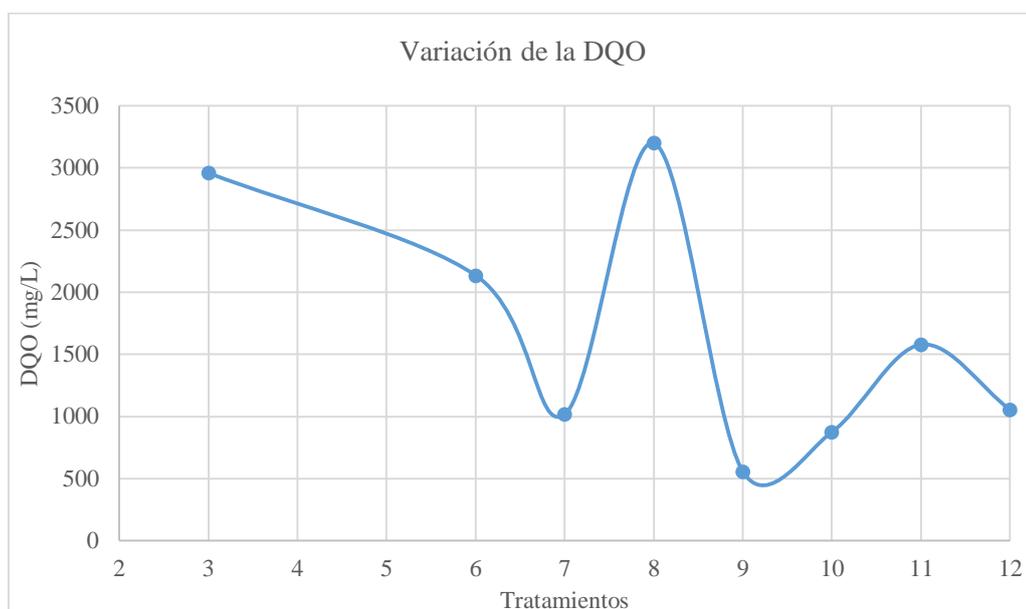
La turbidez es uno de los parámetros que muestran mayor eficiencia de remoción al aplicar el tratamiento fenton, todos los tratamientos generaron un porcentaje de remoción superior al 80%. El mejor resultado se dio en el tratamiento 7, con una turbidez de 2,90 NTU antes de la optimización de reactivos. como se observa en el gráfico, la turbidez no excede los 70 NTU.

Una alta reducción de turbidez se puede observar también en los tratamientos 4 y 5, sin embargo, mostraron coloración amarilla, lo que impide su aplicación. Como lo señala (Sánchez 2015) la concentración de los reactivos debe ser cuidadosamente administrada, ya que su exceso causará

inhibición de las reacciones debido a la captura de radicales HO· por ambos reactivos, limitando la mineralización en la mezcla acuosa. El peróxido de hidrógeno se consume rápidamente y el hierro no tiene con qué especie reaccionar, esto provoca la coloración amarilla, así se verificó que las condiciones de operación no eran óptimas y se requiere buscar la dosis adecuada de reactivos.

Diversas industrias han conseguido valores importantes de remoción, entre ellas, industria cartonera 99,75% (Figueroa y Zambrano 2018), la industria textil por encima del 99,60% (Terán 2015), de lixiviados de 65% a 98% (Medina, Montero y Cruz 2017). En la industria láctea se logró el 99,19% antes de la optimización de los reactivos y 99,78% después de la misma como se muestra en la tabla 14-3, este valor es superior comparado con las mencionadas.

#### 3.2.1.4. Análisis de la demanda química de oxígeno en el método fenton



**Gráfico 7-3:** Análisis de la DQO en el método fenton

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

Este parámetro fue analizado en los tratamientos que presentaron menor turbidez y fueron incoloros. La remoción de DQO varió de 53,79% a 87,36% tratamientos 8 y 10 respectivamente, con la optimización de reactivos, el porcentaje aumentó a 92,21%, con una concentración de 539,25 mg/L de DQO el cual está muy cerca de cumplir la normativa para su vertido al alcantarillado público.

Según la investigación realizada por (Menéndez 2018) sobre la reducción de DQO en lactosuero, la eficiencia de remoción fue 78,93%, valor menor al de la presente investigación.

### 3.2.1.5. Análisis del tiempo de reacción

(Rubio-Clemente, Chica y Peñuela 2014) citando a (Ghosh et al., 2010) menciona que el método fenton con bajos períodos de reacción consigue altos niveles de remoción de contaminantes, motivo por el cual se aplicó 30 minutos de contacto en la prueba de jarras, 10 minutos a 300 rpm y 20 minutos a 100 rpm.

Como lo indica (Castillo y Gómez 2011) En la mezcla rápida se dispersan los reactivos dando choques de partículas que genera su agrupación. Al disminuir la velocidad se forman flóculos más grandes que generalmente se sedimentan.

Pasados los 30 minutos de agitación el agua registró una coloración amarilla fuerte, por lo que se dejó en reposo. Pasadas 24 horas, la coloración continuaba, de igual forma a las 48 horas. A las 72 horas las muestras clarificaron, al medir turbidez y DQO se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 14-3. Por este motivo se consideró este lapso de tiempo el ideal para el tratamiento.

La importancia del tiempo de reposo según (Pérez 2005) es que las masas de partículas formadas en las reacciones fenton por acción de la gravedad se sedimenten logrando clarificar totalmente el agua.

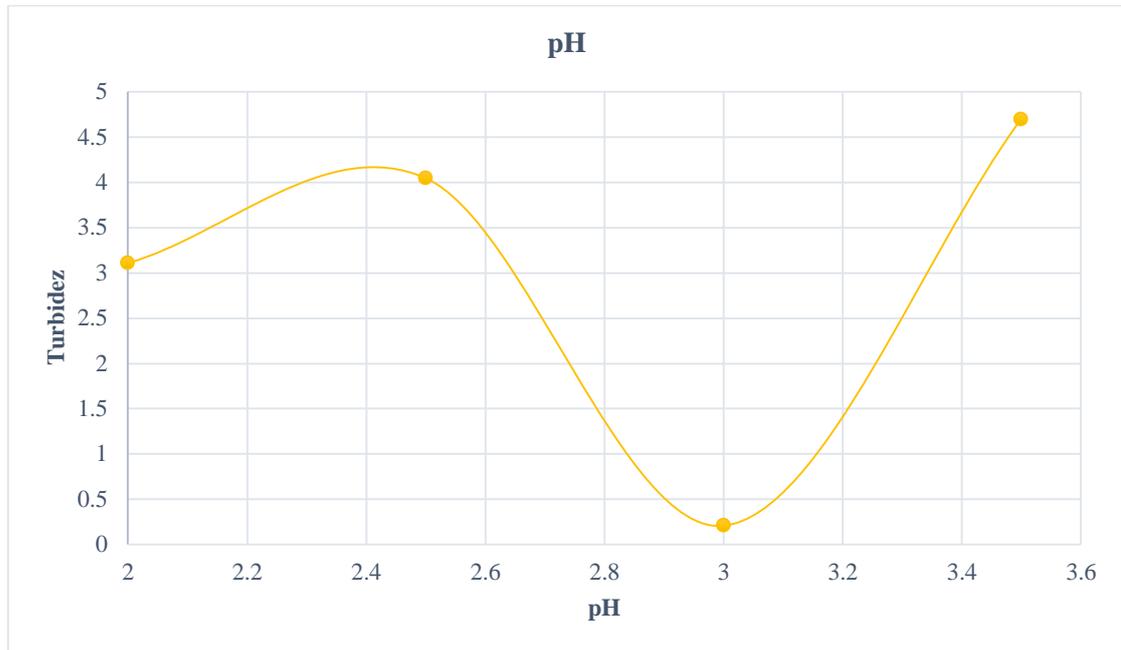
### 3.2.2. Ajuste de pH

**Tabla 15-3:** Optimización de pH en el método fenton a partir de la reducción de turbidez

Tratamientos	pH	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Turbidez (NTU)	Porcentaje de remoción (%)
1	2,00	331,50	5537,00	3,11	99,10
2	2,50	331,50	5537,00	4,05	98,83
3	3,00	331,50	5537,00	0,21	99,94
4	3,50	331,50	5537,00	4,70	98,65

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

### 3.2.1.3. Análisis del pH en el método fenton



**Gráfico 8-3:** Análisis del pH

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

Todos los tratamientos muestran altos porcentajes de remoción como se observa en la tabla 15-3, variando entre 98,65% y 99,94%. el mejor resultado es para el tratamiento 3 con un pH de 3,0 tal como lo indica (Zazo Martínez 2004) en su investigación.

Como plantea (Szpyrkowicz y Cols, 2001; citados en Menéndez 2018) a partir de la precipitación de  $Fe^{3+}$  a  $Fe(OH)_3$  se da la descomposición de  $H_2O_2$  en  $O_2$  y  $H_2O$ , todo esto en condiciones de pH superior a 3, posteriormente, se genera  $Fe(OOH)^{2+}$  que tiene una velocidad baja de reacción con peróxido, obstaculizando la generación de radicales hidroxilo, la reacción entre los radicales  $OH\cdot$  y  $H^+$  es importante bajo estas condiciones, donde se ha formado la especie  $Fe(OOH)^{2+}$  y la regeneración del catalizador por el  $H_2O_2$  se ve inhibida.

Los resultados para aguas residuales lácteas difieren del resto de investigaciones, como se observa en el gráfico 8-3, el rango de pH es eficiente de 2,0 a 3,5 cuando se trata de la turbidez como se observa en la tabla 15-3. Sin embargo, se requiere analizar cada uno de los contaminantes para asegurar que no haya grandes variaciones en la eficiencia de remoción al aplicar estas condiciones de acidez.

### 3.3. APLICACIÓN DEL MÉTODO FOTO-FENTON

**Tabla 16-3:** Análisis microbiológico del agua previo a la aplicación del proceso Foto-fenton

Parámetro	Resultado (UFC/100 mL)
Coliformes fecales	500,00

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

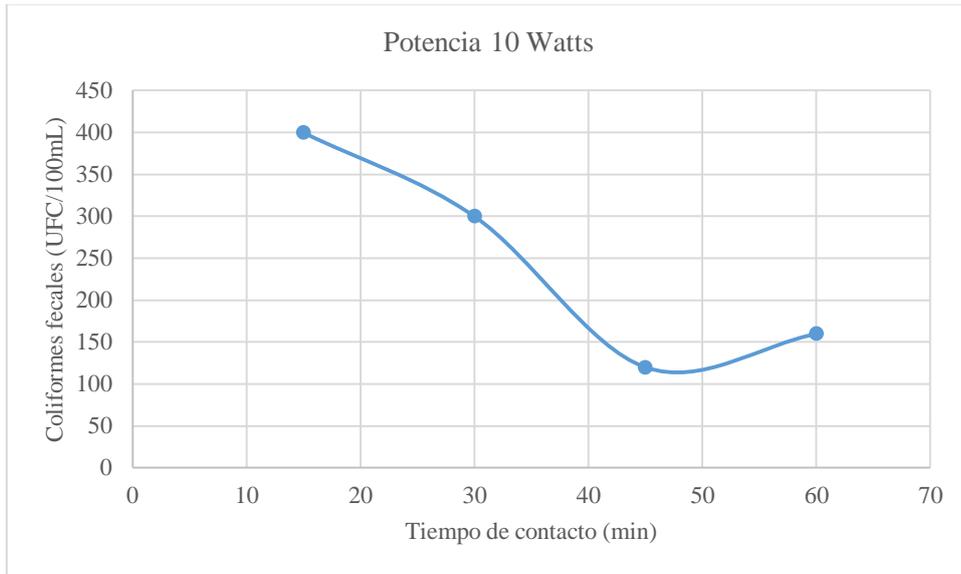
El proceso fenton, al ser un método físico-químico fuerte, por sí solo logra una reducción muy significativa del material biológico. La concentración inicial de coliformes fecales fue en promedio de 3560,00 UFC/100 mL y la concentración final fue de 500,00 UFC/100 mL. El porcentaje de remoción es de 85,95%

Como afirma (Barrera et al. 2013) en su estudio de Hidrobiología, las bacterias coliformes son los indicadores más confiables en la predicción de otros microorganismos patógenos como enterobacterias, entre ellas *Salmonella* y *Shigella*, responsables de varias infecciones en el ser humano. De aquí la importancia de su análisis.

**Tabla 17-3:** Aplicación del método Foto-fenton

Tratamientos	Potencia de las lámparas (Watts)	Tiempo de contacto (min)	Coliformes fecales (UFC/100 mL)	Eficiencia de remoción de coliformes (%)
1	10	15	400	20,00
2	10	30	300	40,00
3	10	45	120	76,00
4	10	60	160	68,00
5	20	15	90	82,00
6	20	30	81	83,80
7	20	45	78	84,40
8	20	60	50	90,00
9	40	15	82	83,60
10	40	30	72	85,60
11	40	45	65	87,00
12	40	60	50	90,00

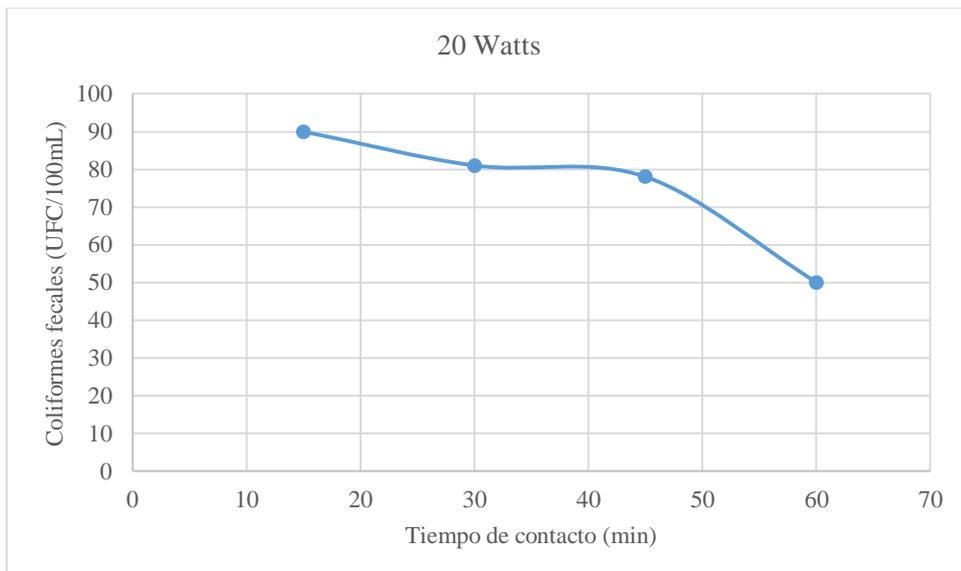
Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019



**Gráfico 9-3:** Variación de coliformes fecales a una potencia de 10 Watts

**Realizado por:** Segovia O., Evelyn. 2019

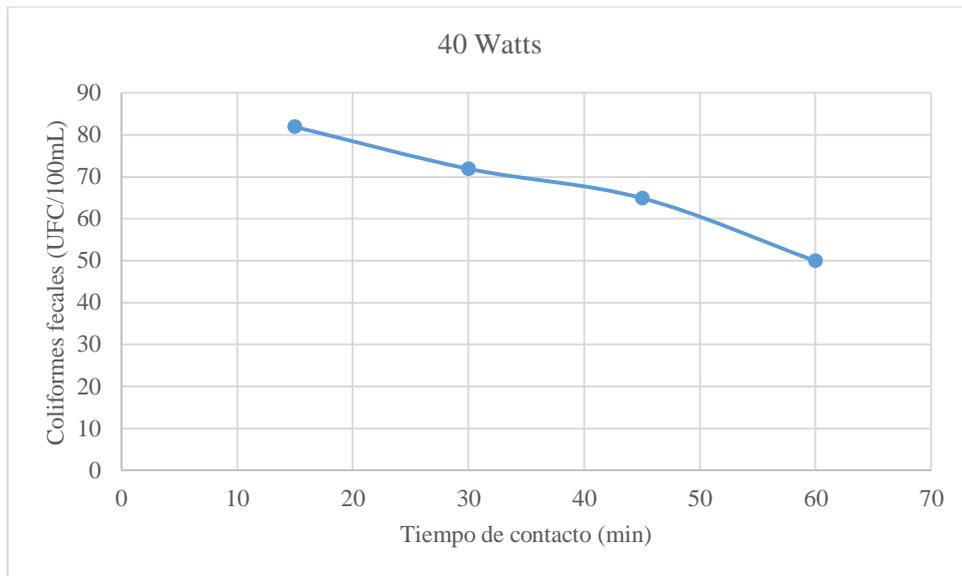
Como se observa en el gráfico 9-3 la lámpara de 10 Watts de potencia muestra la menor eficiencia registrada para remoción de material biológico, se logra un porcentaje de remoción de coliformes de hasta 68% en 60 minutos, un resultado bajo en comparación con los tratamientos con mayor potencia de lámparas.



**Gráfico 10-3:** Variación de coliformes fecales a una potencia de 20 Watts

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Al aumentar la potencia a 20 Watts como se observa en la tabla 17-3 la eficiencia de remoción varía de 82,00% a 90,00%, esto nos indica que existe una relación entre la potencia de la lámpara y la eficiencia del tratamiento, por este motivo se forma una curva descendente (gráfico 10-3). El mejor resultado se da al mayor tiempo de contacto (tratamiento 8).



**Gráfico 11-3:** Variación de coliformes fecales a una potencia de 40 Watts

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Con el uso de la lámpara de 40 Watts, al igual que el caso anterior se forma una curva descendente como se observa en el gráfico 11-3, debido a la eliminación del material biológico con el transcurso del tiempo.

Mientras aumenta el tiempo de contacto, disminuye la carga contaminante, como se observa en la tabla 17-3. De igual manera ocurre con la potencia de las lámparas, al aumentar, tiene mayor eficiencia de remoción. Las lámparas de 20 y 40 watts de potencia muestran altos porcentajes de remoción que mejoran a medida que aumenta el tiempo de contacto, los tratamientos 8 y 12 mostraron los mejores resultados, a los 60 minutos de contacto con una eficiencia de remoción del 90% de coliformes fecales.

La mejor opción de tratamiento es la lámpara de 20 watts debido a que los costos de implementación son menores comparados a la lámpara de 40 watts y su eficiencia es la misma.

La eficiencia de remoción de contaminantes biológicos se debe a dos factores fundamentales, la longitud de onda de las lámparas UV y el contenido de sólidos suspendidos. Según (Trojan engineering, 1994; citado en CONAGUA 2011) se debe el uso de lámparas UVC, las cuales se encuentran entre 200 – 280 nm y cuentan con las longitudes de onda más efectivas para la tarea germicida, siendo la longitud óptima la de 254 nm. En cuanto a los sólidos suspendidos, (CONAGUA 2011) da a conocer que mientras exista menor material coloidal, la luz puede penetrar completamente en los microorganismos ocasionando su destrucción. Por ende, el agua residual previamente tratada mediante el proceso fenton que obtuvo valores muy bajos de sólidos en suspensión es óptima para el tratamiento de Foto-fenton.

La baja eficiencia observada a los 10 minutos de contacto como indica la tabla 17-3, se debe a que no existió un tiempo previo de calentamiento de los reactores, en este caso, se da la evaporación de mercurio, aumenta la presión y la luz UV comienza a producirse, en este tiempo, la alta densidad de las moléculas gasificadas de mercurio impiden la salida de la luz UV y por ende su contacto con el agua residual. (CONAGUA 2011)

### 3.4. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE

**Tabla 18-3:** Análisis de la eficiencia de remoción de la carga contaminante

Parámetros	Unidades	Resultados previos al tratamiento	Resultados posteriores al tratamiento	Eficiencia de remoción de contaminantes (%)
pH	-	5,80	5,02	-
Conductividad	mS	3,30	4,50	-
Turbidez	NTU	347,5	0,77	99,78
Sólidos suspendidos	mg/L	656,5	11,00	98,32
DBO <sub>5</sub>	mg/L	4165,0	151,00	96,37
DQO	mg/L	6925,0	539,25	92,21
Coliformes fecales	UFC/100 mL	3560,0	50,00	98,60

Realizado por: Segovia O., Evelyn. 2019

Debido a que las reacciones fenton se producen en un medio ácido, el pH al finalizar el tratamiento fue de 3,40. Para alcanzar los límites permisibles se usó 1,70 mL de Hidróxido de sodio (NaOH) 5,00 N, el cual no altera las características del agua tratada.

La eficiencia del método Foto-fenton se analiza de acuerdo al porcentaje de remoción de contaminantes. En todos los casos es superior al 90%. La mayor eficiencia se dio para la turbidez con un 99,78% de remoción y para el material biológico expresado como coliformes fecales con un 98,60% de remoción, gran parte de este fue logrado en la etapa de aplicación de método físico-químico sin irradiación, sin embargo, la luz UV fue fundamental para llegar a estos niveles y cumplir la normativa para su vertido sea a cuerpos de agua dulce o al sistema de alcantarillado. La baja concentración de sólidos suspendidos contribuye a obtener estos resultados.

La demanda química de oxígeno (DQO) con un 92,21% de eficiencia de remoción, partiendo de una concentración de 6925,00 mg/L disminuye a 539,25 mg/L, a pesar de ser el parámetro con menor remoción en este estudio, es el más significativo al compararlo con investigaciones en diversos tipos de aguas residuales. En el tratamiento de lixiviados según la recopilación de varios estudios realizada por (Méndez, Iván et al. 2010) muestra una eficiencia de 38% a 85%, en la industria de café soluble según (Ibarra-Taquez, Dobrosz-Gómez y Gómez 2018) varía entre 53,36% a 73,95%, para efluentes químicos (Avendaño y Reyes 2012) señalan aproximadamente el 81%, en la industria petroquímica el 97,50% (Rubio-Clemente, Chica y Peñuela 2014). En la industria láctea, como se ha mencionado previamente, este método no ha sido estudiado profundamente, sin embargo, teniendo en cuenta a (Menéndez 2018) existe una remoción de DQO del 78,93% en lactosuero.

Según (Aranibar 2016) la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) va ligada a la DQO ya que ambos son indicadores de la carga orgánica presente, es decir, que al lograr una reducción del 96,36%, lo que se ha conseguido es reducir ampliamente la carga orgánica contaminante. En muchos casos, conocer la concentración de la DBO da una idea de la carga total de DQO o viceversa. En los ensayos que resultaron con alta concentración de DQO, la DBO se mantuvo baja, esto debido a que los contaminantes fueron oxidados pero el hierro se mantuvo en la muestra ya que no tenía las condiciones correctas para reaccionar.

Como se observa en la tabla 18-3 todos los parámetros analizados cumplen con la normativa ecuatoriana sobre límites de descarga al sistema de alcantarillado tabla 1-1, a excepción de la DQO que se encuentra muy cerca del límite.



## CONCLUSIONES

- El método Foto-fenton es muy eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.
- La hipótesis “El método Foto-fenton a mayor potencia es el más eficiente para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea.” Es aceptada, ya que la potencia de 40 watts mostró los mayores niveles de remoción de contaminantes, sin embargo, la potencia óptima para el tratamiento debe ser superior, para que se logre la remoción del material biológico en menor tiempo de contacto. O a su vez el tiempo de contacto debe ser aumentado conservando la potencia.
- Los parámetros óptimos de operación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales lácteas son:  $\text{Fe}^{2+} = 331,50 \text{ mg/L}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2 = 5537,00 \text{ mg/L}$ ,  $\text{pH} = 3,00$ , potencia lumínica = 20 watts, tiempo de contacto = 72 horas.
- Los reactores UV permitieron la remoción del 98,6% de material biológico contaminante presente en las aguas residuales. La eficiencia de remoción aumenta de manera continua con el aumento de la potencia lumínica y el tiempo de contacto con la luz.
- El agua residual logró cumplir con los límites permisibles exigidos por la Normativa Ecuatoriana TULSMA: Libro VI Anexo 1: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público. A excepción de la demanda química de oxígeno (DQO) que sobrepasa con 39,25 mg/L el límite. La eficiencia de remoción de los contaminantes se expresa en porcentaje, y es la siguiente: Turbidez = 99,78%, Sólidos suspendidos = 98,32%,  $\text{DBO}_5 = 96,37\%$ ,  $\text{DQO} = 92,21\%$ , Coliformes fecales = 98,50%.

## RECOMENDACIONES

- Para mayor fiabilidad de las condiciones iniciales de la muestra, la caracterización de las aguas residuales, debe realizarse en al menos dos laboratorios procurando que sean acreditados.
- La toma y transporte de la muestra debe realizarse en el menor tiempo posible considerando un límite máximo de 4 horas y en refrigeración para que las características no se vean alteradas.
- Optimizar el tiempo de retención para que disminuya la concentración de la carga contaminante.
- Realizar un estudio de trazabilidad de los dos reactivos del proceso Fenton, peróxido de hidrógeno y hierro (II) para determinar sus variaciones a lo largo de todo el proceso.
- Los reactores UV deben tener un lapso de tiempo encendidos de al menos 10 minutos antes de colocar las muestras, para que los gases de mercurio no afecten el contacto de la luz UV con el agua en los primeros minutos de tratamiento.
- Realizar un trabajo técnico con las bases científicas obtenidas en la presente investigación, que permita resolver los problemas reales de contaminación ambiental ocasionados en la industria láctea.

## GLOSARIO

**Catalizador:** Sustancia química que acelera la velocidad de reacción sin obstaculizar o mezclarse en los productos resultantes de esta. (EcuRed [sin fecha])

**Conductividad eléctrica:** Es la propiedad que le permite a una sustancia conducir corriente eléctrica debido a la presencia de iones. (Jaschek 2016)

***E. coli:*** *Escherichia coli* es una bacteria gramnegativa patógena que habita el intestino del ser humano y algunos animales produciendo enfermedades infecciosas que generan problemas de salud. Generalmente se encuentra en productos contaminados o crudos y en ambientes con contaminación fecal. (Organización Mundial de la Salud 2018)

**Efluente:** Residuo líquido resultante de una actividad productiva o industrial que contiene diversas características y puede generar contaminación en el ambiente. (Pérez y Gardey 2017)

**Espectro electromagnético:** Constituye longitudes y frecuencias de ondas electromagnéticas. Las frecuencias teóricamente van de 0 Hertz (Hz) a infinito. Aunque en la realidad se ha demostrado que van desde 1 Hz a  $10^{26}$  Hz con longitudes de onda de  $10^8$  a  $10^{-18}$  m. (Tomé 2016)

**Fotocatálisis:** Proceso por el cual se acelera la velocidad de una reacción por la irradiación de fotones debido a la intensidad de luz incidente, haciendo posibles reacciones que necesitan un suministro de energía. (Nevárez et al. 2017)

**Fotoquímica:** Estudio de los procesos químicos que son provocados o catalizados por emisión o absorción de luz, sea esta visible o ultravioleta. (Textos Científicos 2005)

**Germicida:** Sustancia química o proceso que permite eliminar microorganismos matando la forma vegetativa de estos. Por lo que son usados como desinfectantes. (Malajovich 2018)

**Límites permisibles:** Establecen la concentración o grado máximo que puede tener un elemento, sustancia o parámetro de cualquier naturaleza para que pueda ser vertido o eliminado al medio ambiente en forma de emisiones o efluentes debido a la contaminación o afección que puede tener hacia el medio ambiente. (Ministerio del Ambiente Perú [sin fecha])

**Materia orgánica:** Conjunto de compuestos con base de carbono que se forman por la acumulación de desechos animales o vegetales y se encuentran en continuo estado de descomposición. (Sánchez 2016)

**Mineralización:** Proceso de degradación de la materia orgánica u oxidación de la misma, hasta obtener CO<sub>2</sub>. (Herrmann 1918)

**Oxidación:** Proceso en el cual sustancias químicas (oxidantes) transforman los compuestos contaminantes nocivos en productos inocuos o menos nocivos. Para esto los compuestos químicos se unen al oxígeno y pierden electrones. (Environmental Protection Agency 2012)

**Radicales hidroxilo:** Se originan de la ruptura del enlace covalente entre el hidrógeno y oxígeno de la molécula del agua, son muy reactivos ya que reaccionan muy rápido al entrar en contacto con otras moléculas. (Nieto. Carlos [sin fecha])

**Reactivos:** Productos o sustancias químicas que producen reacciones por lo que se usan en el laboratorio con propósitos analíticos. (Álvarez 2004)

**Sólidos suspendidos:** Residuo no filtrable de las aguas residuales, partículas sólidas de materia que miden más de 0.45 micras de diámetro. (Jaya 2017)

**Trazabilidad:** Identificación del origen y la evolución de un componente a lo largo de un proceso o serie de procesos, análisis de las variaciones y cambios del componente. (Real Academia Española 2019)

**Turbidez:** Pérdida de la transparencia del agua debido a la presencia de materiales suspendidos que impiden el paso de la luz. (González 2011)

## BIBLIOGRAFÍA

**ALMEIDA, Carla.** Estudo da aplicação de UV/FENTON ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) no tratamento de efluentes de laticínios [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidade de São Paulo, Brazil. 2011. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97136/tde-26092012-154151/>

**ÁLVAREZ, José.** "Reactivo y reactante (o reaccionante)". *Panace* [en línea], 2004, vol. 16. [Consulta: 15 junio 2019]. Disponible en: [https://www.tremedica.org/wp-content/uploads/n16\\_entremes\\_AlvarezBlanco.pdf](https://www.tremedica.org/wp-content/uploads/n16_entremes_AlvarezBlanco.pdf)

**AQUALIMPIA ENGINEERING E.K.** *Biodigestor en fábrica de lácteos* [en línea]. 2019. [Consulta: 5 junio 2019]. Disponible en: <https://www.aqualimpia.com/biodigestor-lacteos/>.

**ARANIBAR, María.** Aplicación del reactivo fenton para la remoción de DQO a escala laboratorio (Trabajo de titulación). Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias. (Perú). 2016.

**AVENDAÑO, Gerardo., & REYES, Maritza.** Evaluación del método Fenton para tratamientos de aguas industriales en ingeniería (Trabajo de titulación). Universidad EAN. Bogotá (Colombia). pp. 39. 2012

**BARRERA, Guadalupe; et al.** "La sensibilidad del grupo coliforme como indicador de la presencia de enterobacterias patógenas en cuatro cuerpos acuáticos de México". *Hidrobiológica* [en línea], 2013 (México). vol. 23, no° 1. [Consulta: 1 marzo 2020]. ISSN 0188-8897. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972013000100009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972013000100009)

**BELTRÁN, Norma., & JIMÉNEZ, Blanca.** "Eficiencia de la luz ultravioleta para la desinfección de agua residual con alto contenido de patógenos". *Research Gate* [en línea], 2000. [Consulta: 14 enero 2020]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267789004>

**BIOMÉRIEUX.** "Coliformes". *Biomerieux España* [en línea]. [Consulta: 2 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.biomerieux.es/coliformes>

**CALDERON, Fabiola., & OLORTICO, Stefany.** Proceso foto-fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil (Trabajo de titulación). Universidad Nacional del Centro

de Perú, Facultad de Ingeniería Química. Perú. 2019. pp. 30

**CASTILLO, Juberzay., & GÓMEZ, Glicería.** "Coagulación y floculación". *Tratamiento Físicoquímico y biológico del agua* [en línea]. 2011 (Venezuela) [Consulta: 1 marzo 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/guillermo150782/coagulacion-y-floculacion>

**CASTRO, Laura., & DURÁN, Esteban.,** 2013. "Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada" *Tecnología en Marcha*, vol. 27, (2013) (Costa Rica) pp. 40-50.

**CENTRO DE ACTIVIDAD REGIONAL PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA (CAR/PL).** *Prevención de la contaminación en la Industria láctea.* 2002. [en línea]. Cataluña-España. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <http://www.cema-sa.org>

**CENTRO DE LA INDUSTRIA LÁCTEA DEL ECUADOR.** La leche del Ecuador - Historia de la lechería ecuatoriana. [en línea]. Quito-Ecuador: Effecto Studio, 2015. [Consulta: 5 junio 2019]. Disponible en: [https://cilecuador.org/descargas/LA LECHE DEL ECUADOR.pdf](https://cilecuador.org/descargas/LA_LECHE_DEL_ECUADOR.pdf)

**CONAGUA.** *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Comisión Nacional del Agua* [en línea]. Coyoacán-México: D.R. 2011. Disponible en: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>

**CORPAS, Eduardo.; & FERNANDO, Oscar.** "Reducción de coliformes y *Escherichia coli* en un sistema residual lácteo mediante microorganismos benéficos". *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 10, n° 1 (2012), (Colombia) pp. 66-76.

**CUVI, C.** Determinación de la factibilidad de utilizar sistemas de lodos activados para depuración de aguas residuales industriales procedentes de una fábrica de lácteos y una de confites. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana. Quito-Ecuador. 2017. pp. 36

**DOMÈNECH, Xavier; et al.** "Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes". *ResearchGate* [en línea], 2004. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/237764122\\_Procesos\\_avanzados\\_de\\_oxidacion\\_para\\_la Eliminacion\\_de\\_contaminantes](https://www.researchgate.net/publication/237764122_Procesos_avanzados_de_oxidacion_para_la Eliminacion_de_contaminantes)

**ECURED.** *Catalizador*. [en línea]. [Consulta: 10 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Catalizador>

**ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** "Guía del ciudadano sobre la oxidación química in situ". *Office of Solid Waste and Emergency Response* [en línea]. 2012, (United States). [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: [www.cluin.org/products/citguide](http://www.cluin.org/products/citguide)

**FARIZOGLU, Burhanettin,; & UZUNER, Suleyman.** "The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system". *Biochemical Engineering Journal*, vol. 57, no° 1, 2011. pp. 46-54.

**FIGUEROA, Flora., & ZAMBRANO, Gema.** Tratamiento por oxidación avanzada (reacción de fenton) en aguas residuales de una industria cartonera (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química. Guayaquil-Ecuador. 2018. [Consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: <http://www.fiq.ug.edu.ec/>

**GAIBOR, J.** "Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos El Salinerito - parroquia Salinas - cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento". *Revista de Investigación Talentos* vol. 1. (2014), (Ecuador) pp. 109.

**GARCÍA, Fernando; et al.** "FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DEL PROCESO FOTOFENTÓN PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA". *Manual de Química Ambiental: Fotoquímica Ambiental Parte III* [en línea]. 2015. [Consulta: 14 enero 2020]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/299425823>

**GONZÁLEZ, Carmen.** Monitoreo de la calidad del agua. *Servicio de Extensión Agrícola*, 2011.

**GOYENOLA, Guillermo.** Transparencia, color y turbidez. *RED MAPSA* [en línea]. 2007. [Consulta: 9 marzo 2020]. Disponible en: <http://scene.asu.edu/habitat/equipment.html>, [http://www.ag.auburn.edu/fish/image\\_gallery/details.php?image\\_id=1223](http://www.ag.auburn.edu/fish/image_gallery/details.php?image_id=1223), <http://www.biology.wustl.edu/~lososlab/langerhans/bahphotos.htm>

**GUARQUILA, Mayra.** Tratamiento de efluentes industriales mediante procesos avanzados de oxidación-sector textil (Trabajo de titulación). [en línea]. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química. Quito-Ecuador. 2013. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1307/1/T-UCE-0017-28.pdf>

**GUILLÉN, Leydis; et al.** "Caracterización molecular de cepas de Escherichia coli aisladas de productos lácteos artesanales elaborados en Mérida, Venezuela" *Infectio* [en línea], 2014 vol. 18, no° 3, pp. 100-108. [Consulta: 5 junio 2019]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0123939214000320>

**HERNÁNDEZ, Mónica.** Floculación y Fotocatálisis como procesos combinados en el tratamiento de aguas residuales derivadas de la producción industrial de lácteos (Trabajo de titulación) (maestría). [en línea]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC. Colombia. 2017. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2580/1/TGT\\_1200.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2580/1/TGT_1200.pdf)

**HERRERA, Oscar., & CORPAS, Eduardo.** "Reducción de la contaminación en agua residual industrial láctea utilizando microorganismos benéficos". *Rev.Bio.Agro* [en línea], 2013. [Consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612013000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000100007)

**HERRMANN, J.M.** "Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis heterogénea". (1918)

**IBARRA, Harold; et al.** "Multi-objective optimization of the Fenton process for the treatment of soluble coffee wastewater". *Informacion Tecnologica*, vol. 29, no° 5 (2018), (Colombia) pp. 111-121.

**JASCHEK, Jimena.** Conductividad Eléctrica. *Tiloom* [en línea], 2016. [Consulta: 10 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.tiloom.com/conductividad-electrica/>

**JAYA, Fabián.** Estudio de los sólidos suspendidos en el agua del rio Tabacay y su vinculación con la cobertura vegetal y usos del suelo en la microcuenca (Trabajo de titulación). Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería. Cuenca-Ecuador. 2017.

**JURADO, José.** Degradación de un efluente textil real mediante procesos Fenton y Foto-Fenton (Trabajo de titulación) (maestría). Universitat Politècnica de Catalunya. Cataluña-España, 2009.

**LITTER, Marta.** *Tecnologías avanzadas de oxidación: tecnologías solares*. San Martín-Argentina.

**LÓPEZ, P., & HARNISTH, A.** "Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea (Dairy industry wastewater electrocoagulation)". *Enfoque UTE* [en línea], 2016, no° 1, pp. 13-21. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>

**MACHULEK, Amilcar; et al.** "Fundamental Mechanistic Studies of the Photo-Fenton Reaction for the Degradation of Organic Pollutants". *Environmental and Analytical Update* [en línea], 2012, (Brazil). [Consulta: 16 diciembre 2019]. Disponible en: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

**MALACATUS, Paul; et al.** "Análisis de eficiencia de remoción de contaminantes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en extracción de aceite de palma". *Investigación y Desarrollo*, [en línea], 2016, (Ecuador) vol. 1, no° 2, pp. 61-68.

**MALAJOVICH, María.** *Acción Germicida*. [en línea]. [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: <http://www.bteduc.bio.brguia94>

**MARCÓ, Leandro; et al.** "La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)". *Higiene y Sanidad Ambiental*, vol. 4, (2004) (Argentina) pp. 72.2004.

**MEDIATRADER.** Elegir la potencia adecuada de las bombillas. *Consumer* [en línea]. 2007 [Consulta: 2 septiembre 2019]. Disponible en: <https://www.consumer.es/bricolaje/elegir-la-potencia-adecuada-de-las-bombillas.html>

**MEDINA, Carlos; et al.** "Optimización del proceso fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios fenton". *Rev Soc Quím Perú*. (2017), (Perú).

**MÉNDEZ, Ivan; et al.** "Determinación de la dosis óptima de reactivo fenton en un tratamiento de lixiviados por fenton-adsorción". *Rev. Int. Contam. Ambie.* (2010), (México).

**MENÉNDEZ, Alfredo.** Reducción de la demanda química de oxígeno en lactosuero mediante el proceso Fenton (Trabajo de titulación). [en línea] Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Química. Perú. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7544>

**MINISTERIO DEL AMBIENTE PERÚ.** Estándares de calidad ambiental. (Perú)

**NEMEROW, Nelson., & DASGUPTA, Avijit.** *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos.* Ediciones Díaz de Santos, 2000

**NEVÁREZ, María; et al.** "Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO<sub>2</sub>". *Avances en química* [en línea], 2017. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93357608005>

**NIETO, Carlos.** *Radicales Libres.* Pereira-Colombia.

**NIHON KASETSU.** DBO y DQO para caracterizar aguas residuales [en línea]. 2017. [Consulta: 2 septiembre 2019]. Disponible en: <http://nihonkasetu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>

**ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD.** E. coli. [en línea]. 2018. [Consulta: 10 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>

**PÉREZ, Julián., & GARDEY, Ana.** Definición de efluente - Qué es, Significado y Concepto. [en línea]. 2017. [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: <https://definicion.de/efluente/>

**PÉREZ, Luis.** *Teoría de la Sedimentación.* 2005.

**PIGNATELLO, Joseph.** "Dark and photoassisted iron(3+)-catalyzed degradation of chlorophenoxy herbicides by hydrogen peroxide". *Environmental Science & Technology* [en línea], 1992, vol. 26, no. 5, pp. 944. [Consulta: 13 enero 2020]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es00029a012>

**PIGNATELLO, Joseph; et al.** "Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* [en línea], 2006, vol. 36, no. 1, pp. 1-84. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380500326564>

**PORTERO, Sendra.** RADIACIÓN ULTRAVIOLETA. [en línea]. España: 2016. [Consulta: 25 junio 2019]. Disponible en: <http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/ultravioleta-morrillo.pdf>.

**PROGRAMA CONSOLIDER TRAGUA.** *Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización* [en línea]. 2010 [Consulta: 5 junio 2019]. Disponible en: [http://www.consolider-tragua.com/documentos/tecnologias\\_tratamiento\\_agua.pdf](http://www.consolider-tragua.com/documentos/tecnologias_tratamiento_agua.pdf).

**RAMOS, Katiuska.** "Aplicación de diseño de experimentos en la degradación de desechos por el proceso foto-fenton heterogéneo usando un óxido mixto de MgFeAl". *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente* [en línea], 2016, vol. 28, no° 3. [Consulta: 1 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4277/427750771014/html/index.html>

**REAL ACADEMIA ESPAÑOLA.** trazabilidad | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. [en línea]. 2019. [Consulta: 12 marzo 2020]. Disponible en: <https://dle.rae.es/trazabilidad?m=form>.

**RUBIO, Ainhoa; et al.** "Application of Fenton process for treating petrochemical wastewater". *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, n° 2 (2014), (Colombia).

**RUIZ, Mariana; et al.** *Aplicación del proceso tipo Fenton para minimizar el contenido de carga orgánica de los residuos lácteos provenientes de la fabricación de queso*. Chiapas-México.

**SÁENZ, Gerardo.** *Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria de Lácteos*. [blog]. México: 2018. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <https://www.domosagua.com/blog/tratamiento-aguas-residuales-industria-lacteos>.

**SÁNCHEZ, Concepción.** *Reacciones fenton serie: tratamientos terciarios*. 2015.

**SÁNCHEZ, Pedro.** "Manejo de la materia orgánica para la producción sostenible". *CATIE*, 2016, (Estados Unidos).

**SILVA, Sandra; et al.** "Tratamiento de contaminantes orgánicos por Foto Fenton con luz artificial". *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* [en línea], 2009. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/246/233>.

**TERÁN, Gina.** Reacción de fenton para el tratamiento de efluentes industriales contaminados con colorantes (Trabajo de titulación). Universidad de las Américas, Facultad de Ingenierías y

Ciencias Agropecuarias. Quito-Ecuador. 2015.

**TERÁN, Mery.** Estudio de la Aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada a Aguas Contaminadas (Trabajo de titulación). [en línea]. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña-España. 2016. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88273/01\\_TFG.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/88273/01_TFG.pdf).

**TEXTOS CIENTÍFICOS.** *Fotoquímica* [en línea]. 2005. [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/fotografia/fotoquimica>

*Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente.* Revisión y Actualización de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua.

**TIRADO, Diego; at el.** "Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea". *Producción + Limpia* [en línea], 2016, vol. 11, no. 1, pp. 171-184. [Consulta: 23 junio 2019]. Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/1125>

**TOMÉ, César.** *El espectro electromagnético.* [en línea]. 2016. [Consulta: 11 marzo 2020]. Disponible en: <https://culturacientifica.com/2016/08/16/el-espectro-electromagnetico/>

**VALENCIA, Elizabeth., & RAMÍREZ María.** "La industria de la leche y la contaminación del agua". *Elementos. Revista de Ciencia y Cultura*, 2009, vol. 16, pp. 27.

**YAMAL, Evelyn.** Efficient Operation of photo-Fenton Process for the Treatment of Emerging Contaminants in Water Solutions (Trabajo de titulación) (doctorado). Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña-España. 2013.

**ZAZO, Juan.** Oxidación de Fenol de Aguas residuales mediante H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>/Carbón activo (Trabajo de titulación) (doctorado). Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Area de Ingeniería Química. Madrid-España. 2004

## ANEXOS

### ANEXO A MUESTREO



**Fotografía 1:** Quesera Airón



**Fotografía 2:** Lugar de salida del efluente



**Fotografía 3:** Tanques de salida del efluente



**Fotografía 4:** Recolección de muestras

# ANEXO B CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL



## LABORATORIO DE SERVICIOS AMBIENTALES

Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación No. OAE LE C 12-006

Nº SE: 130 - 19

### INFORME DE ANALISIS

NOMBRE: Evelyn Segovia

INFORME Nº: 130 - 19

Nº SE: 130- 19

EMPRESA: Proyecto de Tesis ESPOCH

DIRECCIÓN: 18 de Marzo y Gilberto Obando - Chambo

FECHA DE RECEPCIÓN: 18 - 09 - 19

FECHA DE INFORME: 24 - 09 - 19

TELÉFONO: 0961286953

NÚMERO DE MUESTRAS: 1, Agua residual, Industria Láctea, Chambo

TIPO DE MUESTRA:

IDENTIFICACIÓN:

MA - 301 -19

Agua residual

El laboratorio se responsabiliza solo del análisis, no de la obtención de las muestras.

### RESULTADO DE ANÁLISIS

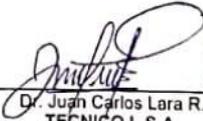
MA - 301-19

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO/PROCEDIMIENTO	RESULTADO	U(K=2)	FECHA DE ANÁLISIS
* Turbiedad	FTU - NTU	STANDARD METHODS 2130 B	327	N/A	18 - 09 - 19
* Sólidos Suspendidos	mg/l	STANDARD METHODS 2540 D	653	N/A	18 - 09 - 19
* DBO5	mg O2/l	STANDARD METHODS 5210 - B	4230	N/A	18 - 09 - 19
DQO	mg/l	STANDARD METHODS 5220 - D mod	7950	+/- 10 %	18 - 09 - 19
* Coliformes Totales	UFC/100 ml	STANDARD METHODS 9221 C	7100	N/A	18 - 09 - 19
* Coliformes Fecales	UFC/100 ml	STANDARD METHODS 9221 C	1800	N/A	18 - 09 - 19

MÉTODOS UTILIZADOS: Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWWA, WPCF, STANDARD METHODS 21ª EDICIÓN y métodos HACH adaptados del STANDARD METHODS 22ª EDICIÓN.

### RESPONSABLES DEL ANÁLISIS:

r. Juan Carlos Lara R.  
Benito Mendoza T., Ph.D.

  
Dr. Juan Carlos Lara R.  
TECNICO L.S.A.



-Los resultados de este informe corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizada(s).  
- Los ensayos marcados con (\*) no se encuentran dentro del alcance de acreditación del SAE.  
-Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio

## ANEXO C OPTIMIZACIÓN DE REACTIVOS FENTON



**Fotografía 5:** Preparación de la solución madre de  $\text{FeSO}_4$



**Fotografía 6:** Agitación de las muestras



**Fotografía 7:** Muestras a las 0 horas de aplicado el tratamiento



**Fotografía 8:** Muestra a las 72 horas de aplicado el tratamiento



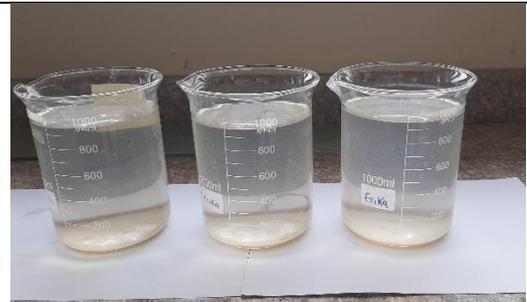
**Fotografía 9:** Tratamientos 4 y 5. Muestran coloración amarilla



**Fotografía 10:** Tratamiento 9 (óptimo)



**Fotografía 11:** Réplicas al tratamiento óptimo, a las 0 horas.

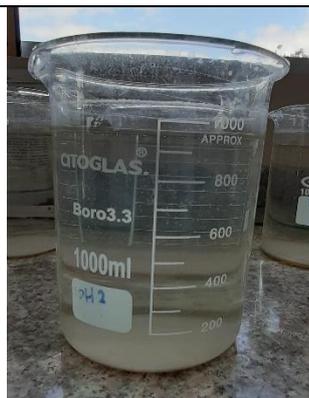


**Fotografía 12:** Réplicas al tratamiento óptimo, a las 72 horas.

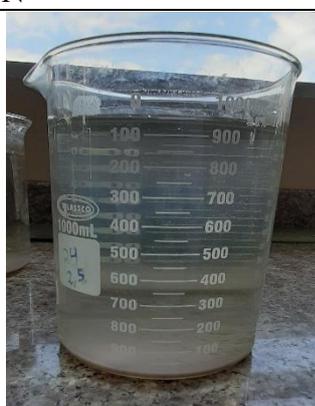
## ANEXO D AJUSTE DE pH



**Fotografía 13:** Ajuste de pH utilizando  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1N



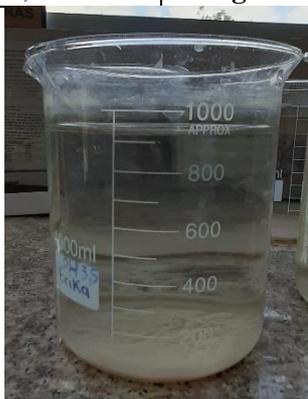
**Fotografía 14:** Tratamiento a pH 2,00



**Fotografía 15:** Tratamiento a pH 2,50



**Fotografía 16:** Tratamiento a pH 3,00



**Fotografía 17:** Tratamiento a pH 3,50

ANEXO E MEDICIÓN DE PARÁMETROS



**Fotografía 18:** Medición de la turbidez



**Fotografía 19:** Medición de los sólidos suspendidos



**Fotografía 20:** Preparación de muestras para medir DQO



**Fotografía 21:** Digestión de la muestra para medir DQO



**Fotografía 22:** Medición de DQO en el fotómetro



**Fotografía 23:** Medición de pH



**Fotografía 24:** Medición de DBO

## ANEXO F APLICACIÓN DEL MÉTODO FOTO-FENTON



**Fotografía 25:** Construcción de los reactores UV



**Fotografía 26:** Muestras de 1 L previas al paso por los reactores UV



**Fotografía 27:** Reactor UV de 10 watts



**Fotografía 28:** Reactores UV de 40 y 20 watts

## ANEXO G TOMA DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE COLIFORMES



**Fotografía 29:** Toma de muestras del agua tratada mediante foto-fenton para el análisis de coliformes fecales

## **ANEXO H ESPECIFICACIONES DE LAS LÁMPARAS UV**

Frecuencia: 60 Hertz

Voltaje: 110 Voltios

Temperatura mínima de operación: -5 grados centígrados

Turbiedad: menor a 5 NTU

Longitud de onda: UV-C

Reemplazo lámpara UV-C 8000 a 9000 Horas

Lámpara UV germicida 40 watts

Medidas: 120 cm de longitud y 2,54 cm de diámetro

Lámpara UV germicida 20 watts

Medidas: 60 cm de longitud y 2,54 cm de diámetro

Lámpara UV germicida 10 watts

Medidas: 35 cm de longitud y 2,54 cm de diámetro