

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**TESIS:**

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TRES PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS  
DEL EFLUENTE LÍQUIDO DEL CAMAL “RÉGULO BERNAL TORRES”  
UTILIZANDO PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADO FENTON**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentada por:

**Bachiller: JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**

Asesor:

**M. Sc. VITOLY BECERRA MONTALVO**

**Cajamarca - Perú**

**2019**

COPYRIGHT © 2019 BY  
**JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**  
Todos los derechos reservados

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**TESIS APROBADA:**

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TRES PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS  
DEL EFLUENTE LÍQUIDO DEL CAMAL “RÉGULO BERNAL TORRES”  
UTILIZANDO PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADO FENTON**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentada por:

**Bachiller: JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**

**JURADO EVALUADOR**

M. Sc. Vitoly Becerra Montalvo  
Asesor

Dr. Eduardo Glicerio Torres Carranza  
Jurado Evaluador

Dr. Segundo Berardo Escalante Zumaeta  
Jurado Evaluador

Dr. Elfer Germán Miranda Valdivia  
Jurado Evaluador

Cajamarca - Perú

2019



**Universidad Nacional de Cajamarca**  
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD  
**Escuela de Posgrado**  
CAJAMARCA - PERU



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Siendo las 10:35 horas del día 13 de diciembre de dos mil diecinueve, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. EDUARDO GLICERIO TORRES CARRANZA** y, **Dr. SEGUNDO BERARDO ESCALANTE ZUMAETA**, **Dr. ELFER GERMÁN MIRANDA VALDIVIA**, y en calidad de Asesor el **M.Sc. VITOLY BECERRA MONTALVO**. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada: **EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TRES PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL EFLUENTE LÍQUIDO DEL CAMAL “RÉGULO BERNAL TORRES” UTILIZANDO PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADO FENTON**; presentada por el **Bach. en Ingeniería Química JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBACIÓN con la calificación de EXCELENTE (18) la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bach. en Ingeniería Química JORGE ANTONIO DELGADO SOTO**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrícolas, con Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**.

Siendo las 11:50 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

  
.....  
**M.Sc. Vitoly Becerra Montalvo**  
Asesor

  
.....  
**Dr. Eduardo Glicerio Torres Carranza**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Segundo Berardo Escalante Zumaeta**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Elfer Germán Miranda Valdivia**  
Jurado Evaluador

A:

A mi padre, que está en el cielo Don Florencio Delgado Morales

A mi madre Doña Rebeca Soto Cohaila.

A mi hija Thaís Nicol Delgado Ruiz.

A mi esposa Norma Heredia Aponte.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme en esta investigación.

Agradezco a mis padres por enseñarme el valor del estudio.

Agradezco a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por haberme exigido, forjado y formado sobre la base del conocimiento de la ciencia y la humildad.

Agradezco a la vida por permitirme entregar mi profesión y mis mejores años, a la provincia de Jaén.

Agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, porque me dio la oportunidad de formar parte de un grupo de profesores, que siempre hemos querido hacer de la juventud jaenense, hombres y mujeres libres, con pensamiento crítico, éticos, solidarios, científicos, investigadores y humanos.

Agradezco a todos los profesores de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, que con mucho esfuerzo llegaron a las aulas de la Filial Jaén los años 2017 y 2018, para formar Maestros en Gestión Ambiental.

Agradezco este tiempo, que siempre será el mejor tiempo de mi vida.

A la empresa Oikoslab S.A.C. por el financiamiento de la tesis

A mis profesores de pregrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, de la Escuela de Ingeniería Química, que sembraron en mí, el espíritu por el conocimiento de la verdad.

A mis profesores de la maestría en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Cajamarca, que supieron entregar sus conocimientos ilimitadamente.

Al Dr. Fernando Anaya Meléndez, Jefe de Departamento de la Facultad de Química en Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

A los Bachilleres en ingeniería forestal y ambiental, Noymer Franklin Barrantes Salazar y Pepe Luis Rodríguez La Torre, Guisela Milagros Marcelo Sosa, personal auxiliar técnico del Laboratorio Oikoslab S.A.C. por los apoyos brindados durante la ejecución de la presente tesis.

## CONTENIDO

Ítems	Página
AGRADECIMIENTO	vi
CONTENIDO	vii
LISTA DE ILUSTRACIONES	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE ABREVIACIONES	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1    Introducción	1
CAPÍTULO II	3
2.1.    Antecedentes	3
2.2.    Bases Teóricas	4
2.2.1.    Procesos Oxidativos Avanzados	4
2.2.2.    Tipos de procesos de oxidación avanzado	7
2.2.3.    Proceso Fenton	8
2.2.4.    Reactivo de Fenton	9
2.2.5.    Peróxido de hidrógeno	11
2.2.6.    Factores que influyen en el reactivo de Fenton	12
2.2.7.    Influencia del agente oxidante y del catalizador	13
2.2.8.    Influencia de la temperatura	14
2.2.9.    Influencia del pH	14
2.2.10.    Influencia del tiempo de reacción	15
2.2.11.    Influencia del tipo de contaminante	16
2.2.12.    Influencia de los aniones	16
2.2.13.    Efecto de la concentración del reactivo de Fenton	17

2.2.14. Camal o centro de beneficio	18
2.2.15. Efluente del camal	18
2.2.16. Efluente generado en las etapas del proceso	20
2.2.17 Composición del efluente líquido de un camal	21
2.2.18. Normativa de efluentes líquidos de actividades agroindustriales	23
2.3. Definición de términos básicos	24
2.3.1. Color	24
2.3.2. Demanda Química de Oxígeno	25
2.3.3. Turbidez	25
2.4. Objetivos de la investigación	25
2.4.1. Objetivo General	25
2.4.2. Objetivos Específicos	25
CAPÍTULO III	27
MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. Localización del estudio	27
3.2. Equipos, materiales y reactivos	28
3.3. Metodología	28
3.3.1 Trabajo en campo	28
3.3.2. Trabajo en laboratorio	31
3.3.3. Cálculo del porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en los tratamientos y repeticiones	39
3.4. Diseño experimental	40
3.4.1. Análisis de varianza	41

CAPÍTULO IV	44
RESULTADO Y DISCUSIÓN	44
4.1. Resultados del porcentaje de remoción del parámetro color	44
4.1.1. Resultado análisis de varianza en la remoción del parámetro color	44
4.1.2. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro color	45
4.1.3. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro color	47
4.1.4. Prueba Duncan de interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción del reactivo de Fenton (FxT) en la remoción del parámetro color	49
4.2. Resultados del porcentaje de remoción del parámetro DQO	50
4.2.1. Resultado análisis de varianza en la remoción del parámetro DQO	50
4.2.2. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro DQO	51
4.2.3. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro DQO	53
4.2.4. Prueba Duncan de interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción del reactivo de Fenton (FxT) en la remoción del parámetro DQO	55

4.3.	Resultados del porcentaje de remoción del parámetro turbiedad	56
4.3.1.	Resultado análisis de varianza en la remoción del parámetro turbiedad	56
4.3.2.	Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro turbiedad	57
4.3.3.	Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro turbiedad	58
4.3.4.	Prueba Duncan de interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción del reactivo de Fenton (FxT) en la remoción del parámetro turbiedad	60
CAPITULO V		62
CONCLUSIONES		62
CAPITULO VI		63
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS		63
CAPITULO VII		71
ANEXO		71
Anexo 1.	Plano de ubicación del laboratorio Oikoslab S.A.C	71
Anexo 2.	Solicitud de ingreso al camal municipal “Régulo Bernal Torres”	72
Anexo 3.	Informe de caracterización del agua residual del camal municipal	73
Anexo 4.	Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro color	75

Anexo 5.	Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro DQO	76
Anexo 6.	Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro turbiedad	77
Anexo 7.	Análisis de varianza del parámetro color	78
Anexo 8.	Análisis de varianza del parámetro DQO	80
Anexo 9.	Análisis de varianza parámetro turbiedad	82

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Potenciales de oxidación estándar, frente al electrodo de hidrógeno de algunos oxidantes químicos, en medio ácido a 25°C	5
Tabla 2.	Procesos de Oxidación Avanzados	8
Tabla 3.	Valores promedio de concentración de los principales parámetros químicos de las aguas residuales de mataderos antes de la depuración	22
Tabla 4.	Valores Máximos Admisibles de Parámetros Fisicoquímicos de aguas residuales no domesticas que van a ser descargados al sistema de alcantarillado	23
Tabla 5.	Valores Máximos Admisibles de Parámetros inorgánicos de aguas domesticas residuales no domesticas que van a ser descargados al sistema de alcantarillado.	24
Tabla 6.	Georreferenciación del punto de muestreo	28
Tabla 7.	Caracterización del efluente del camal “Régulo Bernal Torres”	32
Tabla 8.	Volumen de dosificación del peróxido de hidrógeno al 30 %	35
Tabla 9.	Parámetros evaluados de la investigación	36
Tabla 10.	Resultados del porcentaje de remoción de remoción de color	44
Tabla 11.	Análisis de varianza parámetro color	44
Tabla 12.	Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis Fenton	45
Tabla 13.	Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de reacción en la remoción del color	47
Tabla 14.	Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción, en la remoción del parámetro color	49
Tabla 15.	Resultados del porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno (%)	50

Tabla 16.	Análisis de varianza parámetro demanda química de oxígeno.	50
Tabla 17.	Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis Fenton.	51
Tabla 18.	Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de contacto en la remoción de la DQO.	53
Tabla 19.	Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción, en la remoción de la DQO	53
Tabla 20.	Resultados del porcentaje de remoción de la turbiedad	56
Tabla 21.	Análisis de varianza parámetro turbiedad	56
Tabla 22.	Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis Fenton	57
Tabla 23.	Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de contacto en la remoción de la turbiedad	58
Tabla 24.	Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción en la remoción del parámetro turbiedad	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Mapa de ubicación del Camal Municipal “Régulo Bernal Torres”	29
Figura 2.	Punto de muestreo	30
Figura 3.	Muestreo del efluente del camal municipal “Régulo Bernal Torres”	31
Figura 4.	Muestra en el laboratorio	32
Figura 5.	Equipo para la medición del pH, multiparámetro marca HANNA, modelo HI 2550.	32
Figura 6.	Homogenización de la muestra	35
Figura 7.	Fotocolorímetro Hash DR-900. Para la determinación del color y los sólidos totales en suspensión	36
Figura 8.	Determinación de la demanda química de oxígeno. Tubo conteniendo la muestra, la solución digestora y la solución catalizadora en el Termoreactor Hanna modelo 839800	37
Figura 9.	Valoración de la muestra y el blanco con sal de Mhor.	38
Figura 10.	Turbidímetro marca HANNA HI-98703	39
Figura 11.	Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción del color	45
Figura 12.	Efecto del tiempo de reacción del reactivo de Fenton en la remoción del color	47
Figura 13.	Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción del DQO	51
Figura 14.	Efecto del tiempo de reacción del reactivo de Fenton en la remoción de la DQO	53

Figura 15. Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción de la turbiedad	57
Figura 16. Efecto del tiempo de contacto del reactivo de Fenton en la remoción de la turbiedad	59
Figura 17. Muestreo del efluente del camal municipal Régulo Bernal Torres	84
Figura 18. Muestreo	84
Figura 19. Llenado del recipiente con la muestra	85
Figura 20. Recipiente conteniendo el efluente	85
Figura 21. Fotómetro marca HANNA modelo HI 83225, empleado para la caracterización de la muestra del efluente	86
Figura 22. Caracterización de la muestra Equipo para la medición del pH, multiparámetro marca HANNA, modelo HI 2550	86
Figura 23. Reactivos empleados para la dosificación	87
Figura 24. Homogenización de la muestra	87
Figura 25. Unidades de muestra de los tres tratamientos para la repetición uno	88
Figura 26. Unidades de muestra del tratamiento 2 para las tres repeticiones	88
Figura 27. Unidades de muestra del tratamiento 3 y sus tres repeticiones	89
Figura 28. Reactivos empleados en la determinación de la demanda química de oxígeno	89
Figura 29. Muestras sometidas a reflujo	90
Figura 30. Valoración de la muestra y el blanco con sal de Mhor.	90
Figura 31. Muestras valoradas	91
Figura 32. Tesista preparando la muestra en el laboratorio	91
Figura 33. Tesista trabajando en el termo reactor	92
Figura 34. Muestra sin tratamiento y con tratamiento del reactivo de Fenton	92

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

POA : Proceso Oxidativo Avanzado

DQO : Demanda Química de Oxígeno

UCV : Unidades de color verdadero

NTU : Unidades Nefelométricas de turbiedad

## RESUMEN

Se determinó la eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente del canal “Régulo Bernal Torres” empleando POA Fenton, se determinó el efecto de la dosificación del reactivo de Fenton en la remoción de los parámetros evaluados y se comparó los resultados de eficiencia de los parámetros obtenidos con las dosificaciones del reactivo de Fenton, en función al tiempo de reacción. Se realizaron tres tratamientos, que fueron: el peso constante del catalizador sulfato ferroso heptahidratado ( $1\text{g FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y el volumen en mililitro de peróxido de hidrógeno, en las relaciones 0.2, 0.4 y 0.6 de  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ , evaluados a los 30, 60, 90 y 120 minutos. Se hizo el análisis de varianza, de los promedios, se desarrolló un diseño factorial de dos efectos principales, dosis de reactivo de Fenton (con tres niveles) y tiempo de reacción (con cuatro niveles) y la interacción de ambos. El mejor resultado de porcentaje de remoción del color fue 92.08% con la dosis de relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.6$ , el mejor tiempo de remoción del color fue a los 120 minutos (90.57% de remoción). EL mejor porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno fue de 32.24%, con la relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.4$  y el mejor tiempo de remoción fue a los 30 minutos (54.80%). En el caso de la turbiedad la mejor remoción fue de 56.37% con la relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.2$  y el mejor tiempo de remoción fue de 50.54% a 120 minutos.

**Palabras claves:** POA, Fenton, color, DQO, turbiedad,

## ABSTRACT

The removal efficiency of three physicochemical parameters of the “Régulo Bernal Torres” pipe effluent was determined using Fenton POA, the effect of Fenton reagent dosing on the removal of the evaluated parameters was determined and the efficiency results of the parameters obtained with Fenton reagent dosages, depending on the reaction time. Three treatments were carried out, which were: the constant weight of the ferrous sulfate heptahydrate catalyst (1g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) and the volume in milliliter of hydrogen peroxide, in the ratios 0.2, 0.4 and 0.6 of  $[\text{Fe}^{+2}] / [\text{H}_2\text{O}_2]$ , evaluated at 30, 60, 90 and 120 minutes. The analysis of variance, of the averages, a factorial design of two main effects, Fenton reagent dose (with three levels) and reaction time (with four levels) and the interaction of both were developed. The best color removal percentage result was 92.08%) with the dose ratio  $[\text{Fe}^{+2}] / [\text{H}_2\text{O}_2] = 0.6$ , the best color removal time was at 120 minutes (90.57% removal). The best percentage of chemical oxygen demand removal was 32.24%, with the ratio  $[\text{Fe}^{+2}] / [\text{H}_2\text{O}_2] = 0.4$  and the best removal time was at 30 minutes (54.80%). In the case of turbidity, the best removal was 56.37% with the ratio  $[\text{Fe}^{+2}] / [\text{H}_2\text{O}_2] = 0.2$  and the best removal time was 50.54% at 120 minutes.

**Keywords:** POA, Fenton, color, COD, turbidity

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Debido a la elevada carga de materia orgánica, que presentó el efluente del camal municipal “Régulo Bernal Torres”, se planteó la posibilidad de emplear el proceso oxidativo Fenton, para lograr la remoción del color, DQO y turbiedad. Se obtuvo la mejor dosificación del reactivo y se comparó los valores de remoción de los tres parámetros en función al tiempo de reacción.

Los procesos oxidativos avanzados (POAs), como el método Fenton, consisten en la reacción del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y el catalizador sulfato ferroso heptahidratado ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), la reacción en medio ácido, genera cargas libres de radicales oxidrilos ( $OH^{\cdot}$ ) permitiendo oxidar contaminantes orgánicos, formando dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua, sales inorgánicas y oxígeno. (Becerra y Cadena, 2016, p.18).

En la investigación realizada por Cruz y Sierra (2016) en los efluentes del laboratorio y las líneas de producción de la empresa de Procesamiento de Cárnicos “El Bohemio”, se observó que luego del tratamiento con el reactivo de Fenton. el contenido materia orgánica, DQO,  $DBO_5$ , aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, cloruros, sulfatos y turbiedad disminuyeron notablemente (p.128).

Méndez, et al (2010) en la investigación realizada sobre los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, a los cuales le aplicaron el reactivo de Fenton, determinaron el tiempo óptimo de reacción, los valores óptimos de pH y dosis de reactivo Fenton y las dosis óptimas para el pos tratamiento de coagulación – floculación. Las condiciones y dosis óptimas del proceso de oxidación fueron: tiempo de contacto de 20 minutos, un valor de pH igual a 4, concentraciones de  $H_2O_2$  de 600 mg/l y  $Fe^{+2}$  de 1,000 mg/l. Los porcentajes de remoción promedio de materia orgánica, medida como DQO, fue de 78%, y medida como COT, del 87%. (p.11).

Los objetivos de la investigación fueron determinar la eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente del camal “Régulo Bernal Torres” empleando proceso oxidativo avanzado Fenton; caracterizar los parámetros de color, demanda química de oxígeno y turbiedad del efluente; determinar el efecto de la dosificación del reactivo de Fenton en la remoción del color, demanda química de oxígeno y turbiedad del efluente y comparar los resultados de los valores de eficiencia de color, DQO y turbiedad, obtenidos con las dosificaciones del reactivo de Fenton, en función al tiempo de reacción.

La toma muestras fue en el camal municipal y los ensayos fisicoquímicos en el laboratorio particular Oikoslab ubicado en el distrito de Jaén.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron: color (51,400 UCV-Pt-Co), DQO (9,813.0 mg O<sub>2</sub>/L) y turbiedad. (400.7 NTU), con el valor de la DQO y la relación estequiométrica de descomposición del peróxido de hidrogeno. Se calculó el volumen necesario de peróxido de hidrógeno al 30%, de acuerdo a los tratamientos y repeticiones propuestos en la investigación, manteniendo constante la concentración de sulfato ferroso. Cada tratamiento se evaluó, en cuatro tiempos 30, 60, 90 y 120 minutos. Se determinó el porcentaje de remoción del color, DQO y turbiedad. Se analizó estadísticamente los promedios de las remociones de los parámetros evaluados. utilizando análisis de varianza, (ANVA), con diseño factorial completamente al azar. Se estableció efectos simples, dosis de reactivo de Fenton, con tres niveles (0.2, 0.4 y 0.6) y tiempo de reacción con cuatro niveles (30, 60, 90 y 120 minutos). Las diferencias estadísticas entre tratamientos, fueron validadas usando Duncan. Los resultados de los efectos simples indicaron que existió significancia, es decir diferencia estadística entre los tratamientos, estableciéndose que el mejor tratamiento es el que presentó mayor valor de remoción.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

Becerra, Horna y Barrionuevo (2014) manifiestan que, las operaciones de matadero generan un efluente complejo y variable, con una elevada concentración de materia, considerándose como una industria con elevado potencial contaminante, indican además que: para plantear alternativas para el tratamiento de las aguas residuales en este tipo de procesos, se debe evaluar una serie de variables para definir la mejor alternativa a implementar. Para ello se hace necesario realizar la caracterización de estos vertimientos teniendo en cuenta los parámetros básicos de calidad de agua (p. 23).

Los residuos líquidos producidos en un centro de beneficio o matadero son efluentes que contienen sangre, rumen, pelos, grasas, proteínas. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión rumen, grasas y aceites, así como vertidos líquidos de la operación de escaldado y lavado de carcazas, limpieza de equipos e instalaciones (Salas y Condorhuaman, 2008, p.29).

Los procesos avanzados de oxidación, se basan en la capacidad in situ de radicales hidroxilos ( $\text{OH}^{\bullet}$ ), especie con un elevado potencial de oxidación, mediante la combinación de un agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), con un catalizador de Fe (II), estos radicales son capaces de oxidar muchos compuestos orgánicos de forma no selectiva y con altas velocidades de reacción. Esta propiedad es aprovechada para conseguir la completa mineralización ( $\text{CO}_2$  y ácidos minerales) de los contaminantes o su degradación en sustancias más fácilmente biodegradables. Se han desarrollado Procesos de Oxidación Avanzados (POAs), los cuales

son aplicados generalmente en pequeña o mediana escala y especialmente donde los métodos convencionales pierden eficiencia. (Salas, 2010, p. 30).

Becerra y Cadena (2016) manifiestan que, al evaluar la aplicación del método Fenton a nivel laboratorio en aguas residuales, provenientes del beneficiado avícola y pecuario, para la determinación de la remoción de materia orgánica se hizo una medición de demanda química de oxígeno (DQO) al inicio y al final de la experimentación al igual se realizó el análisis de colorimetría para establecer la dosis adecuada del reactivo Fenton en función del DQO y se evaluó la eficiencia de la oxidación de materia orgánica con el fin de comparar el reactivo Fenton con respecto a los métodos convencionales usados en la planta los cuales son policloruro de aluminio (PAC) y sulfato de aluminio. El tiempo de operación fue de 75 minutos repartidos en 45 minutos utilizando test de jarras con sistemas de agitación y mezcla con regulador de velocidad y 30 minutos para la sedimentación. La mejor relación fue  $DQO/H_2O_2 = 2,1$  y  $H_2O_2/Fe^{+2} = 0,6$  para una oxidación de materia orgánica del 92,13% y una remoción de color del 99,40% (p.18).

Cruz y Sierra (2016) señalan que, el tratamiento realizado con el reactivo de Fenton, en el agua residual, que fluye del laboratorio y las líneas de producción de la empresa de Procesamiento de Cárnicos “El Bohemio”, conteniendo materia orgánica y grasas, disminuyó notablemente los valores de DQO, DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, pH, cloruros, sulfatos y turbiedad (p.128).

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Procesos Oxidativos Avanzados**

Glaze *et al.* (1987), citados por Rubio, Chica y Peñuela (2014) manifiesta que, estos procesos implican la generación de radicales hidroxilos (OH<sup>•</sup>) en cantidades suficientes como para degradar la materia orgánica del medio. Estos radicales, de alto potencial de

oxidación ( $E^\circ=2.80$  V), pueden ser generados por diversos métodos (combinación de ozono/peróxido de hidrógeno, procesos Fenton y foto-Fenton, procesos fotocatalíticos heterogéneos, etc.) y son capaces de oxidar compuestos orgánicos persistentes, posibilitando su completa mineralización y transformación a  $CO_2$ ,  $H_2O$  y otros compuestos inorgánicos estables (p. 212).

Martínez (2010) indica que, los procesos avanzados de oxidación involucran la generación de especies altamente oxidantes que reaccionan rápidamente y que pueden degradar fácilmente sustancias orgánicas (Tabla 1). (p. 31).

Tabla 1: *Potenciales de oxidación estándar, frente al electrodo de hidrógeno de algunos oxidantes químicos, en medio ácido a 25°C*

Oxidante	$E^\circ(V)$
Flúor	3.03
Radicales oxidrilo	2.8
Oxígeno	2.42
Ozono	2.42
Peróxido de hidrógeno	1.78
Radical perhidroxilo	1.7
Permanganato	1.68
Dióxido de cloro	1.57
Ácido hipoclorítico	1.45
Cloro	1.36
Bromo	1.09
Yodo	0.54

Fuente: Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewaters (Bacardi 2007)

Martínez (2010) señala que, estos radicales pueden oxidar contaminantes orgánicos mediante la extracción de hidrógeno o mediante la adición electrofílica a los dobles enlaces presentes para formar radicales libres que pueden reaccionar con moléculas de oxígeno formando peroxiradicales e iniciar una serie de reacciones oxidantes que llevan a la completa mineralización del contaminante orgánico que se desea degradar (p. 31).

Andreozzi *et al.* (1999), citado por GilPavas (2011) menciona que, en los últimos años se ha producido una rápida evolución de la investigación encaminada a la protección del medio ambiente, debido a la contaminación producida por compuestos tóxicos provenientes de la actividad industrial principalmente, y por la aparición de nuevas exigencias sociales políticas y legislativas en la mayoría de los países desarrollados, por lo que se han buscado métodos eficientes que ayuden en la eliminación de contaminantes medioambientales. Las investigaciones se han orientado hacia los métodos de destrucción química, que reciben el nombre de Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), Estos métodos hacen uso de diferentes sistemas reactivos, como la catálisis y la fotoquímica, que se basan en el diseño y construcción de sistemas para el aprovechamiento de la radiación U.V. o luz visible, de reactores fotoquímicos y métodos de preparación de nuevos fotocatalizadores, operando usualmente a presión y temperatura constante (p.17).

Andreozzi *et al.*, (1999), citado por GilPavas (2011), expresa que, una característica común de estos procesos es que se basan en la producción de radicales ( $\text{OH}^{\bullet}$ ). Legrini *et al.*, (1993), citado por GiliPavas (2011) manifiesta que, este radical es el principal responsable de la oxidación de compuestos o materia orgánica presente en una disolución, puede participar en la disolución de cinco mecanismos diferentes (p.17).

Forero, Ortiz y Ríos (2005), indican que, actualmente los estudios se enfocan en la búsqueda de valores óptimos para los diferentes parámetros que afectan el proceso de oxidación: pH, temperatura, diseño del reactor, naturaleza y concentración del

contaminante, y agentes oxidantes que puedan mejorar la reacción. Además, se estudia con detalle la cinética de reacción, que generalmente es de primer orden con respecto a la concentración de radicales hidroxilos y a la concentración de las especies a ser oxidadas (p. 97).

Legrini, Oliveros y Braun (1993) indican que, la abstracción del hidrógeno se refiere a la interacción de los radicales ( $\text{OH}^\bullet$ ) con los compuestos orgánicos ( $\text{H-R-H}$ ), produciendo el radical ( $\text{RH}^\bullet$ ) al eliminarle al hidrógeno; este radical reacciona rápidamente con el oxígeno disuelto formando un peroxoradical orgánico ( $\text{RHO}_2^\bullet$ ), altamente inestable. Con esto se da paso a las reacciones de oxidación térmica que liberan al radical  $\text{R}^\bullet$ , éste reacciona con el oxígeno y radicales  $\text{OH}^\bullet$  libres en disolución, oxidándose así el radical orgánico, ecuación 1 y 2:



Estos radicales pueden oxidar contaminantes orgánicos mediante la extracción de hidrógeno o mediante la adición electrofílica a los dobles enlaces presentes para formar radicales libres que pueden reaccionar con moléculas de oxígeno formando peroxiradicales e iniciar una serie de reacciones oxidantes que llevan a la completa mineralización del contaminante orgánico que se desea degradar.

### **2.2.2. Tipos de procesos de oxidación avanzado**

En la Tabla 2 se refleja los procesos principales que hacen parte de los POAs (Aznate, Cerro, y Orozco, 2013)

Tabla 2: *Procesos de Oxidación Avanzados*

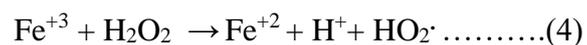
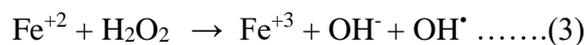
Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O <sub>3</sub> /OH <sup>-</sup> )	Oxidación en agua sub y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno(O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Procesos fotoquímicos
Proceso Fenton (Fe <sup>+2</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta del vacío (UVV)
Oxidación electroquímica	UV/Peróxido de hidrógeno
Radiólisis y tratamiento con haces de electrón	UV/O <sub>3</sub>

Fuente: Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes (Doménech y Jardim, 2002)

### 2.2.3. Proceso Fenton

Pignatello, MacKay y Oliveros (2006) mencionan que, el proceso de oxidación Fenton fue descrito por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton, cuando descubrió que el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) podía activarse con iones ferrosos para oxidar ácido tartárico (p.2).

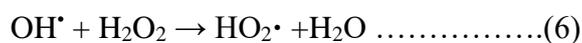
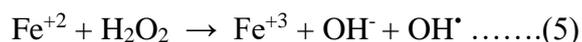
Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en medio ácido, para la formación de radicales OH<sup>•</sup>. A la combinación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sales de hierro se denomina reactivo Fenton (reacciones 3 y 4)

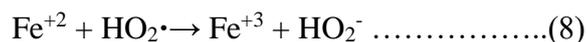


Ghosh *et al.* (2010) citado por (Chica, Peñuela y Rubio, 2014, p. 213).

#### 2.2.4. Reactivo de Fenton

Barbusiński (2009) señala que, el reactivo de Fenton se conoce desde hace más de un siglo y ha sido probado desde hace mucho tiempo como un poderoso oxidante, el mecanismo de la reacción de Fenton sigue siendo un tema de intensa y controvertida discusión. El mecanismo de reacción del radical hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ) y del ion férrico de la reacción de Fenton aún se discuten en la literatura. Dos años después de la muerte de Fenton, el mecanismo del radical hidroxilo fue mencionado por primera vez en 1931 por Haber y Willstätter en un documento acerca de los mecanismos en cadena de los radicales. Sugirieron que el radical  $\text{OH}^\bullet$  podría producirse por reducción de un electrón de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por  $\text{HO}_2$  (hoy se conoce como una reacción muy lenta en ausencia de metales catalizadores) y que  $\text{OH}^\bullet$  podría abstraer el hidrógeno de un enlace carbono-hidrógeno e iniciar reacciones en cadena. En 1932, Haber y Weiss sugirieron la producción de  $\text{OH}^\bullet$  por un electrón de reducción de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por  $\text{Fe}^{+2}$ . De acuerdo con la clásica interpretación de Haber y Weiss, la reacción del hierro (II) con el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en solución acuosa conduce a la formación de radicales  $\text{OH}^\bullet$  y  $\text{HO}_2^\bullet$  como intermediarios activos en las reacciones (5) y (6) que son descritas posteriormente. Sin embargo, este trabajo no menciona acerca de la oxidación de compuestos orgánicos. La reacción (5) se conoce como la reacción de Fenton, aunque él nunca la escribió. En 1946, Baxendale, Evans y Park, sugirieron que los radicales hidroxilos  $\text{OH}^\bullet$  de la reacción (5) se agrega a dobles enlaces de carbono y por lo tanto pueden iniciar una reacción de polimerización. En 1951 Barb et al, modificaron el mecanismo original de Haber y Weiss. Proponiendo las siguientes reacciones:





Se trata de reacciones en cadena la reacción (5) sirve como inicio, los pasos (8) y (9) como terminación y el ciclo (5) - (6) - (7) forma la cadena que es donde se origina el oxígeno ( $\text{O}_2$ ). (p. 348 y 349).

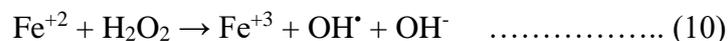
Es un proceso de oxidación avanzada en el que la carga contaminante se trata con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso a presión atmosférica y a una temperatura de entre  $20^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ . siguiendo una apropiada política para el agregado del reactivo Fenton en condiciones ácidas y de temperatura adecuada, el proceso puede alcanzar una significativa degradación de los contaminantes orgánicos comprendiendo:

Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un tratamiento biológico posterior (Terán, 2016, p. 23).

Una oxidación parcial que redunde en una disminución de la toxicidad del efluente. Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que posibilitan una descarga segura del efluente sin necesidad de un posterior tratamiento. Además de degradar la materia orgánica, los procesos Fenton se utilizan también, para reducir la demanda química de oxígeno (DQO), reducir la toxicidad de la muestra a tratar, aumentar la biodegradabilidad (Terán, 2016, p. 23).

Rodríguez (2003), citado por Aznate, Cerro y Orozco (2013) manifiestan que el reactivo de Fenton en una mezcla de peróxido de hidrógeno y una sal de hierro II, fue descubierta por Henry J.H. Fenton a finales del siglo XIX. En cualquiera de sus varias formas, este sistema está siendo cada vez más usado en el tratamiento de aguas y suelos contaminados.

En la reacción de Fenton el  $\text{Fe}^{+2}$  actúa como catalizador, en la descomposición del peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$ , dando lugar a radicales  $\text{OH}^\bullet$ , que actúan como especies oxidantes, esto lo podemos observar en la reacción (10)



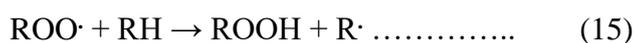
En esta reacción, los iones  $\text{Fe}^{+3}$  se van acumulando en el sistema a medida que los iones  $\text{Fe}^{+2}$  se consumen y la reacción finalmente se detiene (p. 27).

### **2.2.5. Peróxido de Hidrógeno**

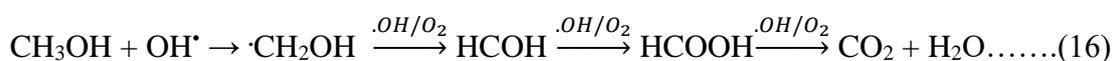
Botelho, Cleto y Rodríguez (2008) expresan que, el peróxido de hidrogeno se ha utilizado durante varios años para el tratamiento de efluentes industriales y de aguas potables, principalmente con el objetivo de remover materia orgánica, es un oxidante versátil, superior al cloro, dióxido y al permanganato de potasio. Tiene la capacidad de producir radicales hidroxilo vía catálisis, bien sea en presencia o ausencia de radiación (p. 29).

Los radicales hidroxilos se consideran especies con mayor energía para degradar compuestos recalcitrantes. La característica selectiva del peróxido de hidrógeno favorece su uso en diferentes aplicaciones. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el  $\text{H}_2\text{O}_2$  puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento de efluentes industriales. Es importante resaltar que el exceso en la aplicación del peróxido de hidrogeno y altas concentraciones de radicales  $^\bullet\text{OH}$  origina reacciones competitivas que producen efectos inhibitorios en la degradación de los compuestos (Botelho, Cleto y Rodríguez, 2008, p.30).

Las reacciones del peróxido de hidrógeno frente a un compuesto orgánico inician con la abstracción del átomo de hidrógeno sobre el radical inicial.



Por ejemplo, la reacción (16) con el metanol procede como sigue:



El ataque por el radical  $OH^{\bullet}$ , en la presencia del oxígeno inicia complejas reacciones de oxidación en cascada, que conlleva a la mineralización de los compuestos orgánicos, las rutas exactas de estas reacciones aún no están totalmente resueltas. Por ejemplo, los compuestos orgánicos clorados, primero se oxidan a compuestos intermediarios tales como aldehídos y ácidos carboxílicos y finalmente a dióxido de carbono ( $CO_2$ ), agua y al ión cloruro. El nitrógeno en compuestos orgánicos generalmente es oxidado a nitratos ( $NO_3^-$ ) o a nitrógeno libre ( $N_2$ ). El sulfuro es oxidado a sulfato. El cianuro es oxidado a cianato, que luego será oxidado a  $CO_2$  o a  $NO_3^-$  o tal vez a  $N_2$  (Munter, 2001, p. 60 y 61).

### 2.2.6. Factores que influyen en el reactivo de Fenton

Rubio, Chica y Peñuela (2014) mencionan que, diversos autores como Pontes *et al.* (2010), Ghosh *et al.* (2010), Neyens y Baeyens (2003), coinciden en que el rendimiento del proceso Fenton depende entre otros factores, de la concentración del agente oxidante y catalítico, temperatura, pH y tiempo de reacción. También citan a Pignatello *et al.* (2006) y Kavitha y Palanivelu (2004) quienes señalan, que la eficiencia de este proceso está relacionado con la naturaleza del contaminante a degradar y con la presencia de otros compuestos orgánicos e inorgánicos (p. 214).

Ghosh, *et al.* (2010) señalan que los procesos biológicos se usan comúnmente, para eliminar cargas orgánicas ya que a menudo resulta más barato. Los tratamientos biológicos requieren alta tiempo de residencia y el acondicionamiento de las aguas residuales a tratar (dilución, ajuste del pH, aclimatación de micro-organismo, etc.), En algunos casos, los procesos biológicos no pueden ser preferidos sobre todo aquellos que particularmente presentan elevada carga orgánica, alta toxicidad y presencia de compuestos biorrecalcitrantes. A menudo, para aguas residuales con elevada DQO, el tratamiento biológico no es la mejor opción y es mejor seleccionar otras opciones (p.1021).

La efectividad del reactivo de Fenton, está en función de la característica selectiva del peróxido de hidrógeno. Simplemente ajustando factores como el pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción, adición de catalizadores, el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) puede oxidar compuestos orgánicos complejos en compuestos menores, menos tóxicos y más biodegradables, razones para convertir esta aplicación en una solución atractiva para tratamiento. (Rodríguez, Botelho y Cleto, 2008, p. 38). Neyens, y Baeyens (2003), mencionado por Rubio, Chica y Peñuela (2014) indica que la cantidad de  $H_2O_2$  y de sales de hierro a utilizar depende del tipo de contaminante que se pretenda remover. Cabe destacar que el  $H_2O_2$ , requiere de grandes cantidades de  $Fe^{+2}$  para su descomposición en radicales  $OH\cdot$ . Es de esperar que la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas sea mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador; sin embargo, grandes cantidades de  $H_2O_2$  y de  $Fe^{+2}$  limitan el porcentaje de degradación del contaminante, favoreciendo las reacciones secundarias (p. 213).

### **2.2.7. Influencia del agente oxidante y del catalizador**

Neyens y Baeyens (2003) expresan que la cantidad de  $H_2O_2$  y de sales de hierro a utilizar depende del tipo de contaminante que se pretenda remover. Cabe destacar que el  $H_2O_2$ , requiere de grandes cantidades de  $Fe^{+2}$  para su descomposición en radicales  $OH\cdot$ . Es de

esperar que la velocidad de degradación de las moléculas orgánicas sea mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador; sin embargo, grandes cantidades de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y de  $\text{Fe}^{+2}$  limitan el porcentaje de degradación del contaminante, ya que se favorecen las reacciones secundarias (p.34).

### **2.2.8. Influencia de la temperatura**

Rubio, Chica y Peñuela (2014) manifiestan que a pesar de que el proceso Fenton puede ocurrir a temperatura ambiente, un aumento de ésta favorece la cinética de las reacciones de oxidación (p. 213).

Homem (2009), citado por Rubio, Chica y Peñuela (2014), manifiesta que el proceso Fenton es posible trabajarlo a temperatura ambiente. Martínez y López (2001), mencionado por Méndez (2010) manifiestan, que el proceso Fenton trata la carga contaminante con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), a presión atmosférica, temperatura entre 20 y 40 °C y en condiciones ácidas.

Homem *et al.* (2009) mencionan que la viabilidad de operar a altas temperaturas (alrededor de 70°C), consiguió remociones de benzo ( $\alpha$ ) pireno (10  $\mu\text{g/L}$ ) del 90 y 100% a 30 y 70°C, respectivamente, utilizando el reactivo de Fenton. (p. 3).

Malicová, Hajduková y Nezvalova (2009) indican que, no obstante, el incremento de temperatura puede disminuir la estabilidad del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , ya que altos valores de temperatura aumentan la velocidad de degradación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  a  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . (p. 24).

### **2.2.9. Influencia del pH**

Rubio, Chica y Peñuela (2014) señalan que el pH es una de las variables más significativas en el proceso Fenton. estudios sobre el reactivo Fenton han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5-4.0 (p.216)

Durán-Moreno, *et al.* (2011), Pignatello, *et al.* (2006) y Xu, *et al.* (2004) mencionados por Rubio-Clemente, Chica y Peñuela (2014) indican que el pH óptimo, para la formación

de radicales  $\text{OH}^\bullet$  es 2.8, a partir de la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en presencia de  $\text{Fe}^{+2}$  (p.216).

Maliková, Hajduková y Nezvalova (2009) manifiestan que, para optimizar el proceso, el pH de la reacción se deberá encontrar en el intervalo de 3 a 5,5. Si el pH es más alto, la velocidad de reacción y la eficiencia del proceso de degradación disminuyen. La razón es la pérdida de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{+2}$ ) en la solución causados por su coagulación en forma de hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). El pH bajo provoca una descomposición excesiva del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) a oxígeno y agua.

Pignatello *et al.* (2006) expresan que, las condiciones de pH muy ácidas o muy alcalinas dan lugar a un descenso en la velocidad de degradación de los contaminantes. Un aumento del pH conduce a la precipitación del hierro como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , impidiendo que se lleve a cabo la reacción (10) y por tanto, la regeneración de  $\text{Fe}^{+2}$ . Por otro lado, a pH excesivamente ácido se forma  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$  (ion hexaaquahierro (II)), el cual reacciona lentamente con el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , ralentizando la generación de radicales  $\text{OH}^\bullet$  (p.8).

Pignatello *et al.* (2006) y Xu *et al.* (2004), citados por Rubio, Chica y Peñuela (2014) manifiesta que el pH es una de las variables más significativas, en el proceso Fenton. Estudios sobre el reactivo Fenton han demostrado que sólo es efectivo para un rango de pH que oscila entre 2.5-4.0.

Durán-Moreno (2011) citado por Rubio, Chica y Peñuela (2014) indica que el valor óptimo del pH es 2.8, para la formación de radicales  $\text{OH}^\bullet$  a partir de la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en presencia de  $\text{Fe}^{+2}$

### **2.2.10. Influencia del tiempo de reacción**

Ghosh, *et al.* (2010) indican que, desde un punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia no es viable de hecho, con bajos períodos de

reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química. (p.1021).

Según Ghosh et al, (2010) mencionado por Rubio, Chica y Peñuela (2014) manifiestan que, desde el punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia, no es viable; de hecho, bajos periodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química (p. 217).

En la investigación realizada por Becerra y Cadena (2014), en agua de beneficio, indican que el tiempo de contacto para que el reactivo de Fenton, en el cual todo hierro en estado de oxidación (II), empieza a precipitar en 75 minutos. Haciendo dos evaluaciones a los 45 y 75 minutos (p. 56).

#### **2.2.11. Influencia del tipo contaminante**

Bianco *et al.* (2011) mencionados por Rubio, Chica y Peñuela (2014) mencionan que, a altos niveles de contaminantes, aumenta el número de colisiones entre éstos y el catalizador y los radicales  $\text{OH}^*$ , lo cual posibilita y acelera la degradación de los compuestos tóxicos, sin embargo, una cantidad excesiva de contaminantes en las aguas podría reducir dichas colisiones, disminuyendo la velocidad de reacción (p. 217).

#### **2.2.12. Influencia de los aniones**

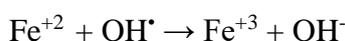
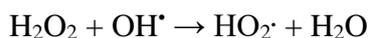
Malicova, Hajduková, y Nezvalova (2009) manifiestan que, determinados aniones, tanto orgánicos como inorgánicos, participan en la formación de complejos de hierro, impidiendo que éste siga reaccionando. La formación de tales compuestos depende, en gran medida, del pH, e influye directamente en la cantidad de iones férricos y ferrosos libres en el agua, restringiendo el ciclo catalítico del proceso Fenton (p.24).

### 2.2.13. Efecto de la concentración del reactivo de Fenton

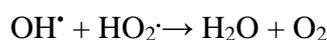
Domenech *et al.*, (2004) citado por Rubio A., Chica E., Peñuela, G. (2014), manifiestan que, además de formarse radicales OH<sup>•</sup>, se generan radicales perhidroxilo (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>), los cuales inician una reacción de oxidación en cadena para eliminar la materia oxidable. Sin embargo, los radicales HO<sub>2</sub><sup>•</sup> presentan menor poder de oxidación que los ·OH, como se indica en las reacciones (p. 213).



Ghosh *et al.*, (2010), citado por Rubio-Clemente, A., Chica E., Peñuela, G. (2014), indican que un exceso de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y/o de iones de hierro al inicio del proceso, respecto de la cantidad de contaminante a tratar, limita la eficiencia del mismo.



De igual modo, puede producirse la recombinación de radicales OH<sup>•</sup> y/o la reacción de éstos con radicales HO<sub>2</sub><sup>•</sup>, traduciéndose en la reducción del rendimiento del proceso Fenton (p. 214).



Méndez (2010) indica que, la concentración y composición inicial de la carga orgánica que puede oxidarse se relaciona con la dosis y con la relación másica [Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] del reactivo Fenton. De lo anterior se desprende la necesidad de determinar las relaciones másicas [Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] con las que se alcanza un mayor grado de oxidación y, por tanto, optimizan el proceso en lixiviados. Las proporciones de [Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] y usadas en investigaciones anteriores han presentado gran variabilidad, por lo cual es importante determinar los valores óptimos para estas relaciones (p.80.).

#### **2.2.14. Camal o centro de beneficio**

Coa (2016) expresa que, un matadero o Camal es una instalación industrial estatal o privada en la que se sacrifican animales de granja para su posterior procesamiento, almacenamiento y comercialización como carne u otra clase de productos de origen animal. La localización, operación y los procesos utilizados varían de acuerdo a una serie de factores tales como la proximidad del productor, la logística, la salud pública, la demanda del cliente, y hasta preceptos religiosos o morales. Los problemas de contaminación por desechos también deben ser evitados a través de un correcto planeamiento y equipamientos adecuados. (p.23).

El Reglamento Sanitario de Faenado de Animales de Abasto, establece que, un camal es un establecimiento, autorizado por un organismo de sanidad y calidad agroalimentaria, en el Perú es Servicio nacional de Sanidad (SENASA), dicho establecimiento debe tener características higiénico sanitarias, apropiadas para realizar actividades de faenado de animales de abasto (Reglamento sanitario de faenado de animales de abasto, 2009, p. 26).

#### **2.2.15. Efluentes del camal**

La Comisión Publico Privada de Sustentabilidad Ambiental de Argentina, establece que, los efluentes se caracterizan por contener restos de sangres, estiércol, grasas, pelos, contenido estomacal, etc. Dependiendo de las características de los mismos, y el tipo de pretratamiento que es posible aplicar a cada uno se puede separar en efluentes rojos y verdes. Así mismo indica que los efluentes rojos están constituidos principalmente por sangre no apta proveniente del desangrado y lavado de reses, etc. y los efluentes verdes formados por contenido estomacal, pelos orina, vómito, estiércol, etc.

En el camal se genera agua residual en los distintos procesos; esta tiene una elevada carga orgánica, tanto disuelta como en suspensión, también contiene ácidos orgánicos volátiles, aminas y otros compuestos orgánicos nitrogenados. (CIMPAR, 2010, p. 19)

Cruz (2015) sostiene que, los establecimientos de sacrificio son instalaciones adecuadas que permiten el beneficio de los animales de abasto, es decir, todas las operaciones que conducen a la transformación de dichos animales en carcasas y despojos (recepción, control de identidad, estabulación, conducción, inspección ante mortem, aturcido, sacrificio, faenado, inspección post mortem, etc.). (p.53).

La comisión público privada de sustentabilidad ambiental de Argentina, (CIMPAR, 2010) establece que, los efluentes se caracterizan por contener restos de sangres, estiércol, grasas, pelos, contenido estomacal, etc. Dependiendo de las características de los mismos, y el tipo de pretratamiento que es posible aplicar a cada uno se puede separar en efluentes rojos y verdes. Así mismo indica que los efluentes rojos están constituidos principalmente por sangre no apta proveniente del desangrado y lavado de reses, etc. Y los efluentes verdes Formados por contenido estomacal, pelos orina, vómito, estiércol, etc. (p.19).

Espinoza (2011) manifiesta que, las aguas residuales de matadero poseen una elevada concentración de materia orgánica, tanto disuelta como en suspensión, que fundamentalmente está constituida por proteínas y sus productos de descomposición, como ácidos orgánicos volátiles, aminas y otros compuestos orgánicos nitrogenados. Las aguas residuales de matadero también tienen una concentración importante de grasas, que pueden interferir gravemente en su tratamiento biológico, así como una concentración variable de productos lignocelulósicos (p. 9).

Diez et al., (1996) mencionado por Espinoza (2011) indican que, su impacto en los cauces receptores es bastante importante, debido al elevado número de establecimientos existentes. En España existen unos 1,850 mataderos que producen en conjunto  $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de aguas residuales al año, lo que en términos de población equivalente supone la carga orgánica biodegradable vertida por una ciudad de 1.300.000 habitantes (p.9).

Espinoza (2011) menciona que las características de las aguas residuales de matadero dependen del tipo de animal sacrificado (aves, cerdos, terneros, corderos, conejos, etc.), del grado de procesado; en particular de estómagos, rumen e intestinos (tripería) y de la posible elaboración de harinas (rendering-plant). El contenido rumenal por lo general se gestiona como subproducto sólido, sin embargo, por lo general el contenido de los estómagos y las mucosidades intestinales se incorpora a las aguas residuales, además Tritt y Schuchardt, (1992) mencionado por Espinoza (2011) señalan que otro factor de incidencia es el equipamiento de retención de líquidos y sólidos y los protocolos de limpieza y uso de agua (p. 9).

#### **2.2.16. Efluentes generados en las etapas del proceso**

El componente inorgánico está constituido por compuestos derivados de productos usados en la limpieza y desinfección de pisos, equipos y maquinaria industrial y se presenta como material inerte en suspensión y sustancias en dilución (fosfatos, nitratos, etc.). (Arenas y Nuncira, 2010) mencionado por (Becerra, Horna y Barrionuevo, 2014, p.18).

Las operaciones de matadero y frigorífico generan un efluente complejo y variable (Espinoza, 2011) mencionado por (Becerra, Horna y Barrionuevo 2014, p.18). Dependiendo de factores como tipo de animal sacrificado, grado de procesado, equipamiento y operaciones de limpieza, con una elevada concentración de materia orgánica, tanto disuelta como en suspensión, que fundamentalmente está constituida por proteínas y sus productos de descomposición, como ácidos orgánicos volátiles, aminas y otros compuestos orgánicos nitrogenados. (Benavides, 2006) mencionado por (Becerra, Horna y Barrionuevo 2014, p.18).

Las aguas residuales de matadero también tienen una concentración importante de grasas, que pueden interferir gravemente en su tratamiento biológico, así como una concentración

variable de productos lignocelulósicos, como aserrín que colocan en los pisos. (Muños, 2005) mencionado por (Becerra, Horna y Barrionuevo, 2014, p.18).

#### **2.2.17. Composición del efluente líquido de un camal**

Becerra y Cadena (2016) señalan que, los vertimientos del agua de beneficio, se caracterizan por el alto contenido de materia orgánica e inorgánica, entre las cuales se encuentran grasas, cloruros, sólidos suspendidos, tenso-activos. Se realizó la caracterización del agua residual, para ello se tomó la muestra de vertimientos de la industria avícola y pecuaria (p. 18).

Las proteínas y grasas son los principales componentes de la carga orgánica presente en las aguas de lavado, encontrándose otras sustancias como la heparina y sales biliares. También contienen hidratos de carbono como glucosa y celulosa, y generalmente detergentes y desinfectantes. Cabe destacar que estas corrientes presentan un contenido de microorganismos patógenos importante (Andrade, 2008, p. 8).

El agua residual de un matadero generalmente contiene un alto índice de grasas, hierro, materia orgánica. Además, presentan elevada demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno.

Por otro lado, la limpieza de los mataderos se realiza con detergente y lejía, lo que contribuiría a contaminar el efluente líquido

En la guía del sector cárnico de España, se aprecia que los valores promedio de la concentración de los principales parámetros químicos de las aguas residuales provenientes de plantas de beneficio son los que se aprecian en la Tabla 3, pudiendo haber variaciones en los valores presentados (Andrade, 2008, p.8).

Tabla 3: *Valores promedio de concentración de los principales parámetros químicos de las aguas residuales de mataderos antes de la depuración.*

Parámetros	Máximo	Mínimo	Promedio
Demanda Química de Oxígeno DQO (mg/L)	35,000	774	10,259
Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5(mg/L)	5,350	500	2,550
Sólidos en Suspensión (mg S.S./L)	5,000	220	2,102
Aceites y Grasas (mg A y G/L)	1,200	23	474
Nitrógeno Total (mg N/L)	750	48	252
Fósforo total (mg P/L)	90	10	40
Cloruros (mg Cl <sup>-</sup> /L)	1,000	649	825
Potencial de iones hidrógeno (pH)	8	6	7

Fuente: Guía de las Mejores Técnicas Disponibles en España en el sector Cárnico (2005)

Sayed *et al.*, (1987) y Massé y Massé (2000) mencionados por Espinoza (2011) indican que, en este tipo de aguas residuales es especialmente significativo que entre el 40 y el 50% de la materia orgánica se encuentra en suspensión, siendo por lo tanto lentamente biodegradable. También destaca el contenido de aceites y grasas, aunque es claramente inferior al de otros vertidos de la industria alimentaria. Sin embargo, los aceites y grasas de estas aguas pueden resultar difíciles de separar por encontrarse emulsionados (p.10).

del Pozo *et al.* (2003) mencionado por Espinoza (2011) indican que, otra característica determinante de éste tipo de efluentes es su biodegradabilidad. Mientras que las aguas residuales urbanas tienen una biodegradabilidad elevada, con una relación DBO5/DQO de 0,5-0,6, las aguas residuales de matadero habitualmente tienen una relación comprendida entre 0,3 y 0,5. Cuando el agua residual tiene un contenido importante de sangre, la fracción mayoritaria de la materia orgánica requiere de hidrólisis previa, debido a la naturaleza proteica de la sangre, lo que ralentiza el proceso de biodegradación. (p.10).

## 2.2.18. Normativa de efluentes líquidos de actividades agroindustriales

Existe el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el período 2012-2013, Resolución ministerial N° 225-2012 Ministerio de Ambiente (MINAM), en donde el Anexo 1 indica la elaboración de Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes de actividades agroindustriales, tales como camales y plantas de beneficio. Por lo tanto, los límites máximos permisibles se encuentran en un plan de proceso. (Alva, 2011, p. 3).

El servicio de saneamiento de agua potable y alcantarillado de Lima (SEDAPAL, 2009) Manifiestan que los valores máximos admisibles de las descargas de aguas residuales no domesticas en el sistema de alcantarillado sanitario D.S. N°021-2009-VIVIENDA, son contemplados, a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, además define los siguientes parámetros, los cuales los divide en dos Anexos de la normativa (Tabla 4 y Tabla 5):

Tabla 4: *Valores Máximos Admisibles de Parámetros Fisicoquímicos de aguas residuales no domesticas que van a ser descargados al sistema de alcantarillado.*

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargas al Sistema de Alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	A.G.	100

Fuente: SEDAPAL-MINISTERIO DE VIVIENDA

Tabla 5: *Valores Máximos Admisibles de Parámetros inorgánicos de aguas residuales no domesticas que van a ser descargados al sistema de alcantarillado.*

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargas al Sistema de Alcantarillado
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN <sup>-</sup>	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr <sup>+6</sup>	0.5
Cromo Total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.5
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfato	mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	500
Sulfuros	mg/L	S <sup>=</sup>	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	80
pH	----	pH	6-7
Solidos Sedimentables	mg/L	SS	8.5
Temperatura	mg/L	°C	<35

Fuente: SEDAPAL-MINISTERIO DE VIVIENDA. (p. 1).

## 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

### 2.3.1. Color

El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales cargadas negativamente; debido a esto, su remoción puede lograrse con ayuda de una sal del ión trivalente como el Al<sup>+3</sup> o el Fe<sup>+3</sup>. El color del agua se debe a la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., (Romero, 2009, p. 109).

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

Es un parámetro analítico de polución que mide el material orgánico contenido en una muestra líquida mediante oxidación química. La determinación de DQO es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte. (Romero, 2009, p. 186).

### **2.3.3. Turbiedad**

La turbiedad refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación (Espigares, García y Fernándezcrehuet, 1999, p. 85). Al respecto Leandro, M. (2004), manifiesta que la turbiedad del agua se genera por la presencia de partículas en suspensión. La velocidad de sedimentación de las partículas pequeñas (menores al micrón de diámetro) es muy baja, por lo que requieren tratamiento para lograrla en tiempos útiles”. (p. 72).

## **2.4. Objetivos de la investigación**

### **2.4.1. Objetivo General**

Determinar la eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente del canal “Regulo Bernal Torres” utilizando proceso oxidativo avanzado Fenton

### **2.4.2. Objetivos Específicos**

Caracterizar los parámetros de color, demanda química de oxígeno y turbiedad del efluente líquido del canal “Régulo Bernal Torres”.

Determinar el efecto de la dosificación del reactivo de Fenton en la remoción del color, demanda química de oxígeno y turbiedad del efluente líquido del canal “Régulo Bernal Torres”.

Comparar los resultados de los valores de eficiencia de color, demanda química de oxígeno y turbiedad, obtenidos con las dosificaciones del reactivo de Fenton, en función al tiempo de contacto establecidos en la presente investigación.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Localización del estudio

La muestra fue tomada del pozo de sedimentación en el camal municipal “Regulo Bernal Torres”, ubicado en el sector La Colina del distrito y provincia de Jaén región Cajamarca. Para las mediciones y determinaciones de los parámetros establecidos, en el estudio, se emplearon las instalaciones, equipos, materiales y reactivos del laboratorio particular Oikoslab S.A.C.

#### 3.2. Equipos, materiales y reactivos

**Equipos y materiales de campo:** GPS de marca Garmin modelo GPSmap64s, cámara fotográfica marca Panasonic, balde plástico con tapa de 20 litros de capacidad, cuerda.

**Equipos de protección personal:** casco, mandil, botas de jebe, mascarilla y guantes de hule.

**Equipos, materiales y reactivos empleados en el laboratorio:** multiparamétrico marca HANNA, modelo HI 2550, fotómetro marca HANNA modelo HI 83225, fotocolorímetro marca HASH modelo DR 900, termo reactor HANNA modelo 839800, turbidímetro marca HANNA modelo 98703, balanza marca RADWAG modelo WTB200, estufa marca NAHYTA modelo 632 plus, vasos precipitados de 1litro de capacidad, tubos de vidrio de 15 mililitros de capacidad con su tapa que resistan el calor, bureta de vidrio de 50 mililitros, probetas graduadas de 50 mililitros de capacidad. Reactivos: solución digestora (secar 0.4903 g de dicromato de potasio  $K_2Cr_2O_7$  por 2 horas a 110 °C, disolver con 50 mililitros de agua destilada en un vaso de 100 mililitros de capacidad, adicionar 16.7 mililitros de ácido sulfúrico concentrado con mucho cuidado, añadir 3.33 gramos de sulfato de mercurio y completar con agua destilada en una fiola de 100 mililitros de

capacidad), solución catalizadora ( 5.5 gramos de sulfato de plata  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  disuelto en 1 litro de ácido sulfúrico, se espera 2 días para su uso) solución estándar de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado 0.05N ( llamada sal de Mohr, se preparó pesando 10 gramos de sulfato ferroso amoniacal hexahidratado  $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{NH}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; el cual se disolvió en 300 mililitros de agua destilada, en una fiola de 500 mililitros de capacidad, se añade 10 mililitros de ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con mucho cuidado y finalmente se enraza a 500 mililitros), solución de dicromato de potasio ( es para la valoración del sulfato amoniacal 0.05 N, se preparó disolviendo 2.452 gramos de dicromato de potasio  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en un litro de agua), solución indicadora ( se pesó 1.485 gramos de 1.10 fenantrolina monohidratada, la cual se disolvió con 0.695 gramos de sulfato ferroso heptahidratado en 100 mililitros de agua destilada), ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , utilizado para corregir el pH), sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y peróxido de hidrógeno grado al 30% ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Estos dos últimos reactivos conforman el reactivo de Fenton

### 3.3. Metodología

#### 3.3.1. Trabajo en campo

##### a) Reconocimiento del área de estudio.

Se reconoció la ubicación exacta del punto de muestreo, identificado como pozo de filtrados, con el sistema de posicionamiento satelital (GPS) cuyas coordenadas son las mostradas en la Tabla 6

Tabla 6: *Georeferenciación del punto de muestreo*

Altitud (msnm)	Coordenadas
693	744266 E 9370821 N

En la Figura 1 podemos observar el mapa de ubicación del camal municipal



**EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TRES PARAMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL EFLUENTE LÍQUIDO DEL CAMAL "RÉGULO BERNAL TORRES" UTILIZANDO PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADO FENTON**

ELABORADO POR: Mg.Ing.Delgado Soto Jorge Antonio



MAPA DE UBICACIÓN DEL CAMAL MUNICIPAL "RÉGULO BERNAL TORRES"

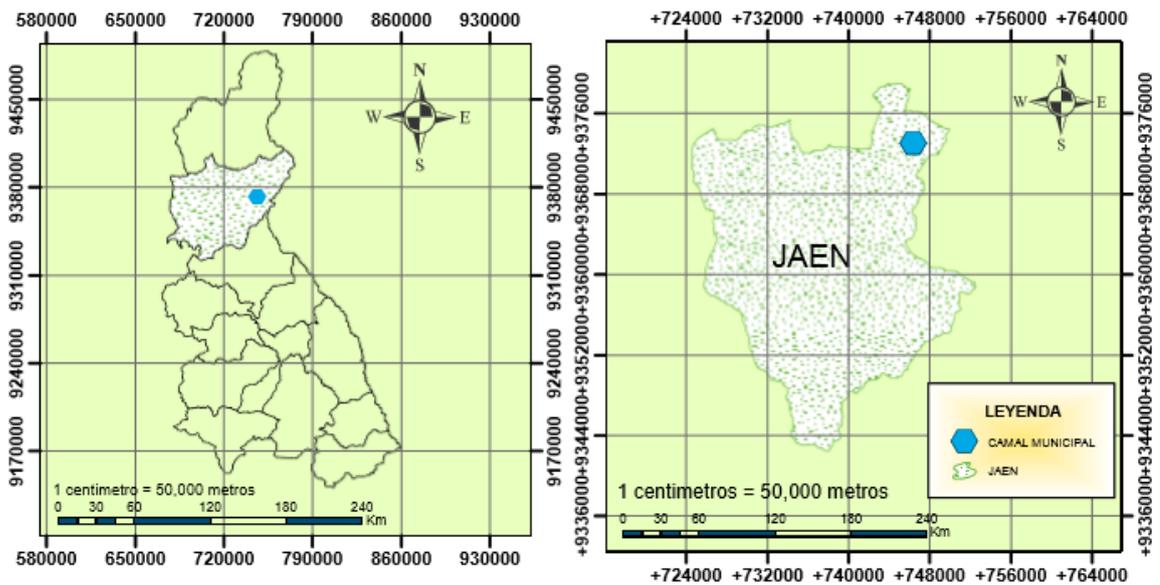
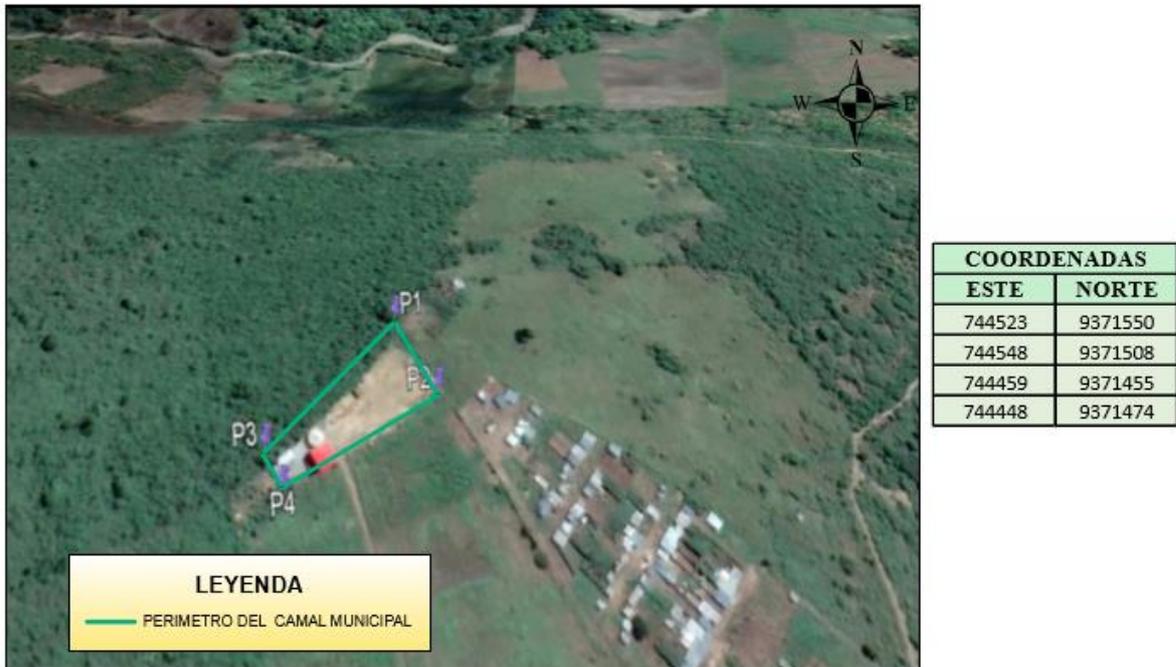


Figura 1: Mapa de ubicación del Camal Municipal "Régulo Bernal Torres"

## **b) Muestreo del efluente del camal**

Se realizó en base al protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales, Dirección General de Salud (DIGESA, 2007) y la guía para la realización de monitoreo ambiental en el sector agrario, del Ministerio de Agricultura, (MINAGRI), la cual indica que, de acuerdo a sus propias características, esta guía puede aplicarse a las cincuenta (50) actividades listadas en el Anexo II del Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, Reglamento del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental, en la cual ubicamos en la actividad número cincuenta, centro de beneficio de animales. (MINAGRI, 2010, p. 23).

Se estableció como punto de ubicación de muestreo el pozo de sedimentación (Figura 2), por donde discurre el efluente, antes de llegar al cuerpo receptor



Figura 2: *Punto de muestreo*

## **c) Recolección de la Muestra**

Para la recolección de la muestra se utilizó un recipiente de plástico de 20 litros de capacidad, una cuerda y una jarra plástica de 2 litros de capacidad (Figura 3).



Figura 3: *Muestreo del efluente del camal municipal Regulo Bernal Torres*

### **3.3.2. Trabajo en el laboratorio**

#### **a) Traslado de la muestra**

Se siguió el protocolo descrito para toma de muestras y su traslado, del Ministerio de Salud y la Dirección General de Salud Ambiental “DIGESA”, que indica que las muestras recolectadas para análisis físico químicos deberán entregarse al laboratorio en el menor tiempo posible, preferentemente dentro de las 24 horas de realizado el muestreo. Además, manifiesta que, para las mediciones y determinaciones del color, turbiedad y demanda química, deben emplearse recipientes de vidrio o de plástico, se omitió el paso del empleo de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ , como preservante, puesto que el laboratorio se encuentra ubicado a 10 minutos del lugar de toma de muestra. La muestra se trasladó al laboratorio, para los respectivos ensayos (Figura 4).



Figura 4: *Muestra en el Laboratorio*

### b) Caracterización de la muestra

Se midieron los parámetros que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: *Caracterización del efluente del camal Régulo Bernal Torres*

Parámetro	Unidades	Resultados
Color	UCV-Pt-Co	51,400.0
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1067
Cloruro de sodio	%NaCl	1.9
Demanda Química de Oxígeno	$\text{mgO}_2/\text{L}$	9,813.00
Nitratos	$\text{mgNO}_3^-/\text{L}$	18,000.0
Nitrógeno como nitratos	$\text{mg N-NO}_3^-/\text{L}$	40.0
Nitrógeno Amoniacal	$\text{mgN-NH}_3/\text{L}$	3,400.0
Amoníaco	$\text{mgNH}_3/\text{L}$	4,100.0
Amonio	$\text{mgNH}_4^+/\text{L}$	4,400.0
pH	Unidades de pH	6.70
Fósforo	$\text{mgP}/\text{L}$	1,200.0
Fosforo como fosfato	$\text{mgP-PO}_4^{-3}/\text{L}$	3,800.0
Sólidos totales en Suspensión	$\text{mgSTS}/\text{L}$	900.0
Turbiedad	NTU	400.70

### c) Preparación de la muestra

El pH inicial de la muestra medido en laboratorio fue de 6.7, este valor se corrigió empleando ácido acético. Los tratamientos y las repeticiones evaluadas se realizaron a pH de 2.8.



Figura 5: Equipo para la medición del pH, multiparámetro marca HANNA, modelo HI 2550.

En la Figura 5, se puede observar el valor de pH acondicionado con ácido acético.

#### d) Dosificación

Para la dosificación se debe considerar la descomposición del peróxido de hidrógeno, Chang (1997) indica que el peróxido de hidrógeno se descompone fácilmente por calentamiento o aun en presencia de ciertos metales, incluyendo el hierro y el cobre



Esta reacción, es además una reacción de desproporción redox en la que el oxígeno contenido en la molécula de peróxido de hidrógeno se oxida y se reduce al mismo tiempo. Las relaciones  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  estudiadas, son 0.2, 0.4 y 0.6, manteniendo una dosis constante del catalizador hierro de 1 gramo.

#### e) Cálculo del peso de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Para encontrar el equivalente de 1.0000 gramos de  $\text{Fe}^{+2}$  a partir del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Realizamos la reacción de disociación:  $\text{FeSO}_4 \rightarrow \text{Fe}^{+2} + \text{SO}_4^-$

Observamos una relación de 1 mol de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  a 1 mol de  $\text{Fe}^{+2}$

$$\text{Peso de } \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1.0000 \text{ g Fe}^{+2} \times \frac{1 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}{55.845 \text{ g Fe}^{+2}} \times \frac{278 \text{ g FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}}{1 \text{ mol FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 4.9783 \text{ g FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$$

**f) Calculo del peso y volumen de peróxido de hidrógeno al 30%**

La determinación del DQO por digestión y valoración dio como resultado 9,813.0 mg O<sub>2</sub>/L.

Con el valor de la demanda química de oxígeno obtenido en la caracterización del efluente y la reacción de descomposición del peróxido de hidrógeno se hizo el cálculo estequiométrico que nos permitió establecer la relación miligramos de O<sub>2</sub> y miligramos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, considerando que el peróxido de hidrógeno que se utilizó estaba al 30% de pureza

$$9.813 \text{ gO}_2 \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{32.00 \text{ gO}_2} \times \frac{2 \text{ mol H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol O}_2} \times \frac{34.02 \text{ g H}_2\text{O}_2}{1 \text{ mol H}_2\text{O}_2} \times \frac{100 \text{ g H}_2\text{O}_2 \text{ (impuro)}}{30 \text{ g H}_2\text{O}_2 \text{ (puro)}}$$

$$= 69.5496 \text{ g H}_2\text{O}_2 \text{ al } 30\%$$

**g) Determinación del volumen del peróxido de hidrógeno al 30% en mililitros**

Con el peso obtenido de: 69.5496 g H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% y la densidad del peróxido de hidrógeno al 30% que es 1.1122 g/ml. Se calculó el volumen a emplear, para la relación 0.2, 0.4 y 0.6

Para el caso de la relación 0.2

$$\text{Fe}^{+2} = 1.0000$$

$$[\text{H}_2\text{O}_2] = 69.5496 \times 0.2 = 13.9099 \text{ g H}_2\text{O}_2 \times \frac{1 \text{ ml H}_2\text{O}_2}{1.1122 \text{ g H}_2\text{O}_2}$$
$$= 12.50 \text{ ml de H}_2\text{O}_2 \text{ al } 30\%$$

Los demás resultados se observan en la Tabla 8.

Tabla 8: Volumen de dosificación del peróxido de hidrógeno al 30 %

Peso de $[\text{Fe}^{+2}]$ (g)	Volumen de dosificación de $\text{H}_2\text{O}_2$ al 30% (ml)		
	0.2	0.4	0.6
1.000	F1=12.50	F2=25.01	F3=37.52

F: Dosis Fenton

Los reactivos empleados para la dosificación se pueden observar en el Anexo.

Luego de cada dosificación la muestra se agitó en un mezclador (Figura 6).



Figura 6: Homogenización de la muestra

#### **h) Tratamientos evaluados de acuerdo a la investigación**

En la investigación se evaluaron tres tratamientos y un blanco o testigo el cual permitió comparar al final de la investigación la eficiencia de remoción de los contaminantes con cada uno de los tratamientos, en los tiempos establecidos por la investigación. Cada uno de los tratamientos tuvo tres repeticiones a excepción del blanco, con lo cual se obtuvo 12 unidades experimentales.

### i) Parámetros fisicoquímicos evaluados para la investigación

Los parámetros evaluados para determinar la eficiencia de remoción fueron: el color, DQO y turbiedad. Las metodologías utilizadas, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: *Parámetros evaluados de la investigación*

Parámetro	Unidades de Medición	Instrumento	Metodología
Color	UCV Pt-Co	Fotocolorímetro Hash DR-900	Método Estándar Platino-Cobalto espectrofotométrico, adaptado al National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). Norma: SMEWW. Ed.20 (2120C) modificado
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	Termoreactor Hanna 839800.	Chemical Oxygen Demand (COD). Reflujo cerrado, Digestión a 160 °C por 2 horas. Valoración con Sulfato Ferroso Amoniacal (Sal de Mohr). Finalmente se determina la DQO con relación. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed.
Turbiedad	NTU	Turbidímetro Hanna 98703	Medición con equipo Turbidímetro marca HANNA HI-98703, normado por la EPA, cumple y sobrepasa los requisitos de la USEPA 180.1 Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 22nd Ed Turbidity. Título: Nephelometric Method.

### j) Color verdadero

Se empleó fotocolorímetro marca HASH, modelo DR-900, cuyo principio se basa en la medición del color verdadero, mediante la comparación instrumental de la muestra y un blanco. Se mide en unidades de platino-cobalto, el método está aprobado por la EPA método 110.2 Revisado en marzo del 2014 bajo el registro 2014-08-01-198. (Figura 7)



Figura 7: *Fotocolorímetro Hash DR-900.*

*Para la determinación del color*

### k) Demanda química de oxígeno (método del reflujo cerrado)

Para esta determinación se realizó una dilución de 0.1 mililitros de la muestra del efluente en 10 ml de agua destilada, de esta dilución se pipetea con la micropipeta 3 mililitro el cual se coloca en un tubo de ensayo termoresistente con tapa, luego se añade 3 mililitros de la solución digestora y 3 mililitros de la solución catalizadora, la muestra se tornó color amarillo, si hubiera salido verde, significaría que la solución catalizadora se estuvo oxidando por lo tanto, se hubiera tenido que volver a hacer otra dilución del efluente. Se calentó la muestra 160°C por 2 horas, en el termoreactor HANNA 839800 junto con un testigo, es decir un tubo de vidrio sin efluente, solo conteniendo agua destilada y los reactivos mencionados en las mismas cantidades (Figura 8).



Figura 8: *Determinación de la demanda química de oxígeno. Tubo conteniendo la muestra, la solución digestora y la solución catalizadora, en el termoreactor HANNA modelo 839800.*

Durante ese tiempo los compuestos orgánicos se oxidaron y simultáneamente redujeron el  $\text{Cr}^{+6}$  del dicromato de potasio a ión crómico  $\text{Cr}^{+3}$ , tal como se muestra en la reacción



Estequiométricamente, la cantidad de materia orgánica oxidada es proporcional a la cantidad de  $\text{Cr}^{+3}$ , y para su determinación se procede a titular el dicromato remanente con una solución de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mhor), en presencia del indicador ferroína, al saber la cantidad del dicromato que queda al finalizar el proceso y por diferencia con la cantidad añadida inicialmente puede determinarse lo que reacciona

Transcurrido el tiempo, la muestra y el testigo se trasvasaron de los tubos de vidrio termoresistentes a dos matraces Erlenmeyer de 100 mililitros, esperando hasta que se enfríe, luego se añade 3 gotas del indicador ferroína y se procede a la valoración con la sal de Mhor, esperando un cambio de coloración a rojo (Figura 9)



Figura 9: Valoración de la muestra y el blanco con sal de Mhor.

Se anotó el volumen gastado con el testigo y el volumen gastado con la muestra y aplicando la fórmula:

$$\frac{mgDQO}{L} = \frac{(V_{gt} - V_{gm}) \times Fc \times Nc \times 8000}{V_{mL \text{ muestra}}}$$

$$Fc = \frac{25 \times 0.05}{V_{ml \text{ gastados en la estandarización de la sal de Mhor}}}$$

Donde:

$V_{gt}$  : volumen gastado por el testigo

$V_{gm}$ : volumen gastado por la muestra

$V_{mL}$  : volumen de la muestra en mililitros

$F_c$  : factor de corrección

$N_c$ : Normalidad corregida

### I) Turbiedad

Se utilizó el equipo turbidímetro marca HANNA HI-98703, (Figura 10) normado por la EPA, el cual cumple y sobrepasa los requisitos de la USEPA 180.1, para aguas residuales y Método estándar 2130B, para agua potable. Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 22nd Ed Turbidity. Título: Nephelometric Method.



Figura 10: Turbidímetro marca HANNA HI-98703

### 3.3.3. Cálculo del porcentaje de remoción de los parámetros evaluados en los tratamientos y repeticiones

Durante cada tratamiento y repetición se evaluaron los parámetros propuestos a los 30, 60, 90 y 120 minutos. El porcentaje de remoción se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Remoción} = \left( \frac{\text{Parámetro}_{\text{blanco}} - \text{Parámetro}_{\text{tratamiento-repetición}}}{\text{Parámetro}_{\text{blanco}}} \right) \times 100$$

**a) Cálculo del porcentaje de remoción del color**

Para calcular el porcentaje de remoción se emplea la siguiente fórmula

$$\% \text{ Remoción color} = \left( \frac{\text{Color}_{\text{blanco}} - \text{Color}_{\text{tratamiento}}}{\text{Color}_{\text{blanco}}} \right) \times 100$$

Para el tratamiento 1, la repetición 1 a los 30 minutos

**b) Cálculo del porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno**

Para calcular el porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno, se emplea la siguiente fórmula

$$\% \text{ Remoción DQO} = \left( \frac{\text{DQO}_{\text{blanco}} - \text{DQO}_{\text{tratamiento}}}{\text{DQO}_{\text{blanco}}} \right) \times 100$$

**c) Cálculo del porcentaje de remoción de la turbiedad**

Para calcular el porcentaje de remoción de la turbiedad, se emplea la siguiente fórmula

$$\% \text{ Remoción turbiedad} = \left( \frac{\text{Turbiedad}_{\text{blanco}} - \text{Turbiedad}_{\text{tratamiento}}}{\text{Turbiedad}_{\text{blanco}}} \right) \times 100$$

Para el tratamiento 1, la repetición 1 a los 30 minutos

**3.4. Diseño Experimental**

Se empleó el diseño completamente al azar con arreglo factorial. Se analizó el efecto de tres dosis del reactivo de Fenton, donde el volumen del peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) se encontraba en relaciones variables ([Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=0.2, [Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] =0.4 y [Fe<sup>+2</sup>]/[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]=0.6) manteniendo el peso del catalizador hierro (Fe<sup>+2</sup>) constante (1.0000 g.) y evaluado en cuatro tiempos de contacto (30, 60, 90 y 120 minutos respectivamente) entre el reactivo de Fenton y el efluente residual

En la prueba de hipótesis para las medias se verificará que:

Factor dosis del reactivo de Fenton (F)

Ho :  $u = 0$  No hay remoción tres parámetros fisicoquímicos, debido a  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$

Ha :  $u \neq 0$  Si hay remoción tres parámetros fisicoquímicos, debido a  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$

Factor tiempo de reacción (T)

Ho :  $u = 0$  No hay remoción tres parámetros fisicoquímicos, debido al tiempo de contacto

Ha :  $u \neq 0$  Si hay remoción tres parámetros fisicoquímicos, debido al tiempo de contacto

### **3.4.1. Análisis de varianza (ANVA)**

Este análisis se efectuó por variable dependiente o de respuesta, es decir para los porcentajes de remoción calculados en los parámetros de la investigación: color, demanda química de oxígeno y turbiedad.

#### **a) Análisis de varianza en la remoción del parámetro color**

Para el análisis de la varianza del color se trabajó con los promedios de los porcentajes de las remociones de color y los promedios de los efectos, por tratarse de un diseño completamente al azar con arreglo factorial, planteándose las siguientes hipótesis estadísticas

Ho:  $(\alpha\beta)_{ij} = 0$  para toda i y j

Ho:  $\alpha_i = 0$  para toda i

Ho:  $\beta_j = 0$  para toda j

Siendo

$\alpha\beta$ : Interacción dosis del reactivo de Fenton y tiempo de reacción

$\alpha$  : Dosis del reactivo de Fenton

i : Relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  : 0.2, 0.4 y 0.6

$\beta$  : Tiempo de reacción (minutos)

j: 30, 60, 90 y 120

### **b) Análisis de varianza en la remoción del parámetro DQO**

Para el análisis de la varianza de la remoción de la demanda química de oxígeno se trabajó con los promedios de los porcentajes de las remociones, por tratarse de un diseño completamente al azar con arreglo factorial, planteándose las siguientes hipótesis estadísticas

$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$  para toda i y j

$H_0: \alpha_i = 0$  para toda i

$H_0: \beta_j = 0$  para toda j

Siendo

$\alpha\beta$ : Interacción dosis del reactivo de Fenton y tiempo de reacción

$\alpha$  : Dosis del reactivo de Fenton

i : Relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  : 0.2, 0.4 y 0.6

$\beta$  : Tiempo de reacción (minutos)

j: 30, 60, 90 y 120

### **c) Análisis de varianza en la remoción del parámetro turbiedad**

Para el análisis de la varianza de la remoción del parámetro turbiedad se trabajó con los promedios de los porcentajes de las remociones, por tratarse de un diseño completamente al azar con arreglo factorial, planteándose las siguientes hipótesis estadísticas

$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$  para toda i y j

$H_0: \alpha_i = 0$  para toda i

$H_0: \beta_j = 0$  para toda j

Siendo

$\alpha\beta$ : Interacción dosis del reactivo de Fenton y tiempo de reacción

$\alpha$  : Dosis del reactivo de Fenton

$i$  : Relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  : 0.2, 0.4 y 0.6

$\beta$  : Tiempo de reacción (minutos)

$j$ : 30, 60, 90 y 120

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados del porcentaje de remoción del parámetro color

$$\% \text{ Remoción color} = \left( \frac{51,400.00 - 5,600.00}{51,400.00} \right) \times 100 = 89.11 \%$$

Los demás resultados los podemos observar en la Tabla 10

Tabla 10. *Resultados del porcentaje de remoción de remoción de color (%)*

Dosis	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
0.2	R <sub>1</sub>	89.11	87.16	89.30	87.94
	R <sub>2</sub>	89.40	87.22	88.72	88.33
	R <sub>3</sub>	89.20	86.87	88.23	87.49
0.4	R <sub>1</sub>	85.80	89.30	87.35	87.32
	R <sub>2</sub>	86.09	89.14	87.28	87.37
	R <sub>3</sub>	86.28	89.36	87.39	87.24
0.6	R <sub>1</sub>	86.87	94.75	88.91	97.67
	R <sub>2</sub>	86.83	94.84	88.77	97.76
	R <sub>3</sub>	86.96	95.14	88.83	97.59

R<sub>1</sub>: repetición 1, R<sub>2</sub>: repetición 2, R<sub>3</sub> repetición 3

#### 4.1.1. Resultado análisis de varianza en la remoción del parámetro color

El análisis de varianza se presenta en la Tabla 11

Tabla 11: *Análisis de varianza parámetro color*

F.V.	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Significancia
Tratam.	11	399.10	36.28	661.46	2.22	*
F	2	145.00	72.50	1321.74	3.40	*
T	3	77.80	25.93	472.76	3.01	*
FT	6	176.31	29.38	535.71	2.51	*
Error Exp.	24	1.32	0.05			
Total	35	400.42				

F.V : Fuente de variabilidad, Tratam. : Tratamiento, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, FT: interacción, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado. Error Exp.: Error Experimental

Coefficiente de variación: 0.26

La Tabla 11 mostró, que existen diferencias significativas entre los tratamientos y también entre los factores (dosis del reactivo de Fenton y tiempo de reacción) y la interacción de los mismos por lo que, conlleva al rechazo de la hipótesis nula. Es posible remover el color, del efluente del camal. Una mayor remoción implica el uso de procesos alterno, como son la neutralización, filtración, coagulación floculación, etc.

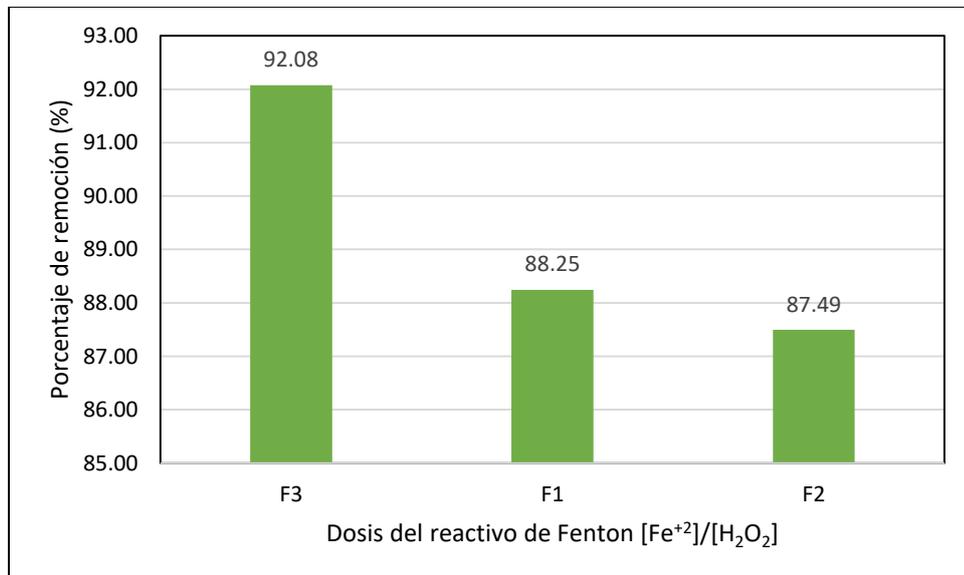
#### 4.1.2 Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05, para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro color

Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis

*Fenton*

F	Medias	Mejor tratamiento
F3	92.08	A
F1	88.25	B
F2	87.49	C



F: dosis Fenton, F1: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.2$ , F2: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.4$ , F3: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.6$ .

Figura 11 Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción del color

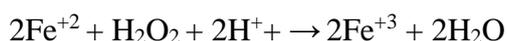
La Tabla 12 y la Figura 11, indicaron, que el mejor tratamiento fue F3, donde la relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$  fue de 0.6, la cual empleó 37.52 ml de peróxido de hidrógeno al 30 % y 1 gramo de catalizador sulfato ferroso, se removió 92.08 % del color.

Méndez (2010) manifiesta que empleando la relación 0.6 en lixiviados de rellenos, obtuvo remoción de color de 94.33 %. (p. 216).

La capacidad de poder establecer un sistema redox a temperatura y presión ambiente, en el cual exista un donador de electrones como el  $\text{Fe}^{+2}$  y un aceptor de los mismos como el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , permite formar radicales  $\text{OH}^{\bullet}$ , los cuales son oxidantes muy enérgicos, estos radicales atacan a las moléculas orgánicas hasta oxidarlas y mineralizarlas.

Glaze *et al.* (1987), citados por Rubio, Chica y Peñuela (2014) manifiesta que, los radicales hidroxilos ( $\text{OH}^{\bullet}$ ) pueden degradar la materia orgánica debido a que poseen de alto potencial de oxidación ( $E^{\circ}=2.80 \text{ V}$ ).

De acuerdo a la reacción química global de Fenton y considerando la disociación del agua, esta puede ser enunciada de la siguiente forma:



Lo que significa que la presencia de iones hidrógeno ( $\text{H}^{+}$ ) son necesarias para la descomposición del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), esto se manifiesta por la necesidad de un medio ácido para producir la máxima cantidad de radicales hidroxilos ( $\text{OH}^{\bullet}$ ).

Investigaciones realizadas, han demostrado que la máxima reactividad se logra a pH 2.8. Un aumento en el pH de la solución, resulta en la especiación y precipitación del hierro y por lo tanto en eficiencias mucho más bajas, estos precipitados incluyen hidróxido de hierro. Si el pH se encuentra por encima de 6, la reactividad del reactivo de Fenton disminuye. En presencia de oxígeno, el hierro ferroso se oxida a férrico, el cual forma

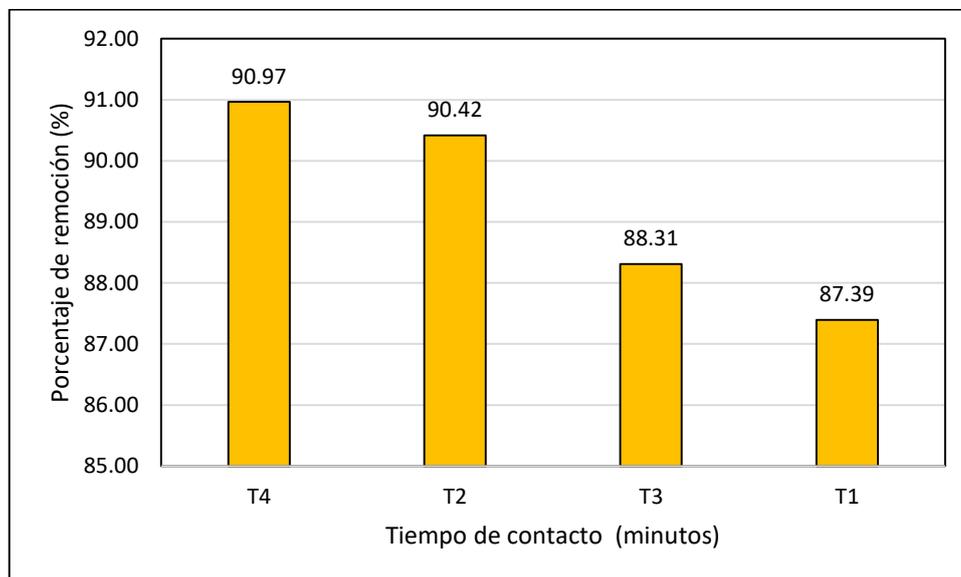
fácilmente óxidos que precipitan. Esta es una gran desventaja, ya que la mayoría de aguas que potencialmente requieren tratamiento, salvo las aguas residuales provenientes de la minería, tienen un pH mayor a 6 y además hay especies Buffer presentes.

#### 4.1.3. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05, para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro color

Los resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de reacción en la remoción del color

T	Medias	Mejor tratamiento
T4	90.97	A
T2	90.42	B
T3	88.31	C
T1	87.39	D



T: Tiempo de reacción, T<sub>1</sub>: Tiempo de reacción 1 (30 minutos), T<sub>2</sub>: Tiempo de reacción 2 (60 minutos), T<sub>3</sub>: Tiempo de reacción 3 (90 minutos), T<sub>4</sub>: Tiempo de reacción 4 (120 minutos)

Figura 12 Efecto del tiempo de reacción del reactivo de Fenton en la remoción del color

La Tabla 13 y la Figura 12, indica que el mejor tiempo de contacto que permite remover el color del efluente es el tiempo 4 que corresponde a 120 minutos, observamos que el tiempo 2 (60 minutos) es muy cercanos en resultados al tiempo 4.

Según Ghosh, *et al.* (2010), desde un punto de vista económico, se ha demostrado que operar con altos tiempos de residencia no es viable de hecho, con bajos períodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química. (p.1021).

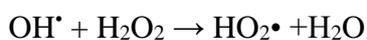
Por lo tanto, puesto que el T4 y el T2 son muy cercanos podríamos detener la reacción a los 90 minutos.

De acuerdo a la reacción propuesta por Henry Fenton en 1824, que indica lo siguiente:



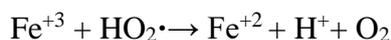
Esta posee una constante una constante de velocidad de reacción igual a  $76.5 \text{ Lmol}^{-1}\text{s}^{-1}$ , lo que significa que, a los 120 minutos, se consigue la mayor remoción del color. Sin embargo, el porcentaje de remoción es similar al conseguido a los 60 minutos,

A los 90 minutos la reacción disminuye su eficiencia de remoción debido a la reacción propuesta por Haber y Weiss en 1934, en donde existe la formación de peroxoradicales  $\text{HO}_2^\bullet$ ,



Estas moléculas disminuyen la cinética de la reacción, ya que el valor de la constante cinética es  $0.01 \text{ Lmol}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

Sin embargo, de acuerdo a la reacción, propuesta por Barb et al en 1951, modificando la reacción de Haber y Weiss



Existe la posibilidad de regenerar el catalizador y conseguir la producción de oxígeno que daría lugar a la producción radicales oxhidrilos.

#### 4.1.4. Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción del reactivo de Fenton (FxT) en la remoción del parámetro color

Los resultados se presentan en la Tabla 14

Tabla 14: *Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción, en la remoción del parámetro color*

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Sig.
F en T1	2	16.30	8.15	148.56	3.40	*
F en T2	2	97.88	48.94	892.21	3.40	*
F en T3	2	4.23	2.12	38.58	3.40	*
F en T4	2	202.90	101.45	1849.51	3.40	*
T en F1	3	8.08	2.69	49.10	3.01	*
T en F2	3	15.80	5.27	96.02	3.01	*
T en F3	3	230.23	76.74	1399.07	3.01	*
Error Exp.	24	1.32	0.05			

F.V. : Fuente de variabilidad, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado, Signific.: significancia

De la Tabla 14, se observa que para el parámetro color, tanto los efectos simples del factor dosis de Fenton (F) sobre los niveles del factor tiempo (T) y viceversa son significativos; es decir, la interacción (efecto de los tratamientos) también resultó ser significativa. Se muestra una significancia (P) de 0.05, hallándose una única dosis con su respectivo tiempo de reacción que predomina sobre las demás, viéndose reflejada en los porcentajes de remoción de las variables de respuesta.

## 4.2. Resultados porcentaje remoción del parámetro DQO

Para el tratamiento 1, la repetición 1 a los 30 minutos

$$\% \text{ Remoción DQO} = \left( \frac{9,813.00 - 3,800.00}{9,813.00} \right) \times 100 = 61.28 \%$$

Los demás resultados los podemos observar Tabla 15.

Tabla 15. *Resultados del porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno (%)*

Dosis	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
0.2	R <sub>1</sub>	61.28	19.49	16.44	3.19
	R <sub>2</sub>	60.97	19.90	17.56	2.78
	R <sub>3</sub>	61.48	19.70	17.05	3.50
0.4	R <sub>1</sub>	75.64	44.97	1.15	8.28
	R <sub>2</sub>	75.39	44.67	1.66	7.57
	R <sub>3</sub>	75.95	45.17	1.25	5.15
0.6	R <sub>1</sub>	27.17	30.84	23.51	1.90
	R <sub>2</sub>	27.42	30.60	23.65	1.72
	R <sub>3</sub>	27.88	30.81	23.93	1.46

R<sub>1</sub>: repetición 1, R<sub>2</sub>: repetición 2, R<sub>3</sub> repetición 3

### 4.2.1. Resultado análisis de varianza en la remoción del parámetro DQO

El análisis de varianza se presenta en la Tabla 16

Tabla 16: *Análisis de varianza parámetro demanda química de oxígeno.*

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Significancia
trat.	11	18894.70	1717.70	5547.79	2.22	*
F	2	783.89	391.94	1265.90	3.40	*
T	3	13432.69	4477.56	14461.54	3.01	*
FT	6	4678.12	779.69	2518.21	2.51	*
Error Exp.	24	7.43	0.31			
Total	35	18902.13				

F.V. : Fuente de variabilidad, Tratam. : Tratamiento, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, FT: interacción, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado, Signific.: significancia. Error Exp.: Error Experimental

Coefficiente de variación: 2.13

La tabla anterior muestra que existe diferencia significativa entre los tratamientos y también entre los factores, por lo que, conlleva a un rechazo de la hipótesis nula, para el parámetro DQO

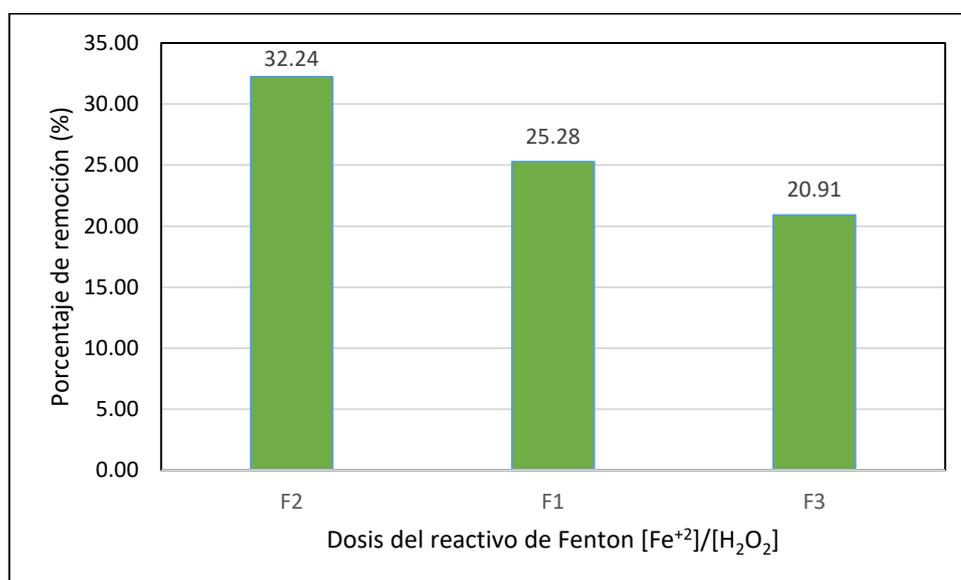
**4.2.2. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05, para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro DQO.**

Los resultados se presentan en la Tabla 17

Tabla 17: Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis

*Fenton.*

F	Medias	Mejor tratamiento
F2	32.24	A
F1	25.28	B
F3	20.91	C



F: dosis Fenton, F1:Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.2$ , F2: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.4$ , F3: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.6$ .

Figura 13. Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción del DQO

La Tabla 17 y la Figura 13 indican que el mejor tratamiento fue el que proviene de la relación F2, cuyas características son:  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.4$ , la cual emplea 25.01 mL de peróxido de hidrógeno al 30 % y 1 gramo de catalizador sulfato ferroso, está relación

removió 32.24% de la DQO. Cuando se agrega una dosis de reactivo de Fenton mayor a la relación  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.6$  observamos que la remoción disminuye, debido a que el catalizador es insuficiente a la relación del volumen de peróxido de hidrógeno. El  $\text{Fe}^{+2}$ , se oxida pasando a convertirse a  $\text{Fe}^{+3}$ , dejando de generar radicales oxhidrilos.

Uno de los factores que facilita la remoción de la DQO, es el pH.

Salas (2010) manifiesta que, la efectividad en la remoción de la DQO, está en relación directa al medio sobre el cual se desenvuelva el reactivo de Fenton. El efecto del pH del medio de reacción tiene una influencia determinante en el proceso de oxidación Fenton, indica que es necesario realizar la reacción a pH ácido para generar radicales  $\text{HO}\bullet$  y conseguir velocidades de oxidación elevadas. Numerosos autores han estudiado la influencia de esta variable en el tratamiento de diferentes efluentes industriales, encontrando el valor óptimo de pH en torno al valor de 3 (p. 36).

Pignatello, Oliveros y McKay (2006), citados por Becerra y Cadena (2016) manifiestan que, el sistema Fenton, depende del pH del medio de la reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH de 2.7. (p.46)

La muestra del efluente fue acondicionada a pH 2.8, para tal efecto se empleó el ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), la ventaja de emplear ácidos inorgánicos como el ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), radica en que se pueden emplear unos pocos mililitros de la cualquiera de ellos para acondicionar el pH, sin embargo, la desventaja es que se podría obtener moléculas complejas con el hierro, las cuales podrían limitar el efecto de remoción del reactivo de Fenton. Se podrían obtener cloruros, sulfatos o nitratos, de acuerdo al orden de los ácidos mencionados. Se debe considerar que el porcentaje de remoción puede mejorar si se incluye otro proceso como

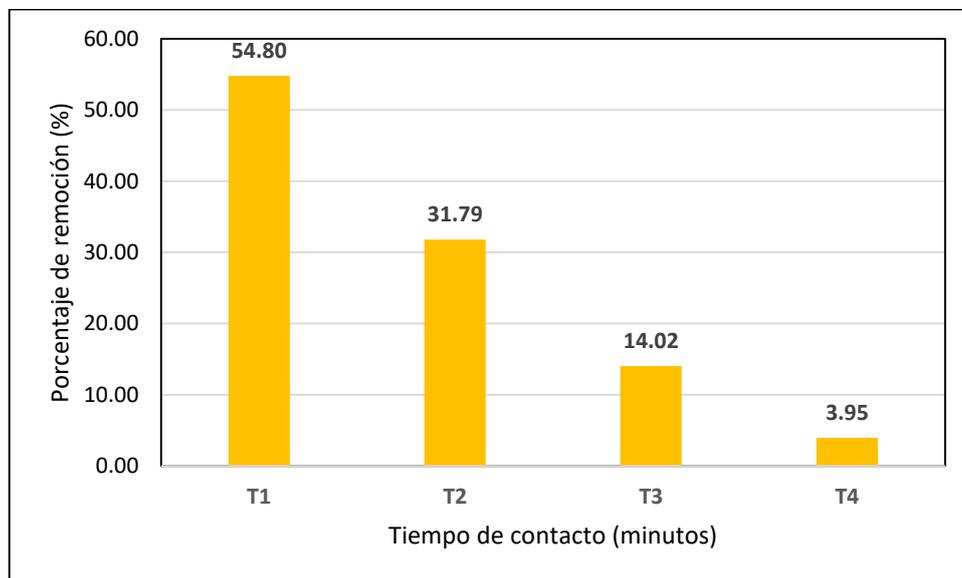
por ejemplo la filtración. Becerra y Cadena (2016) lograron obtener 92.13% de eficiencia, secuenciado el proceso con otro de filtración.

**4.2.3. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05, para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro DQO.**

Los resultados se presentan en la Tabla 18

Tabla 18: *Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de contacto en la remoción de la DQO.*

T	Medias	Mejor tratamiento
T1	54.80	A
T2	31.79	B
T3	14.02	C
T4	3.95	D



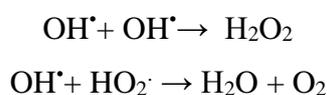
T: Tiempo de reacción, T1: Tiempo de reacción 1 (30 minutos), T2: Tiempo de reacción 2 (60 minutos), T3: Tiempo de reacción 3 (90 minutos), T4: Tiempo de reacción 4 (120 minutos)

Figura 14: *Efecto del tiempo de reacción del reactivo de Fenton en la remoción de la DQO*

De la Tabla 18 y la Figura 14, se observó que la mejor remoción de DQO, se lleva a cabo en el T1, es decir cuando transcurrieron 30 minutos de contacto entre el reactivo de Fenton y el efluente, se removió el 54.80%.

Al respecto Zhang et al (2006) manifiesta que, la acción del reactivo de Fenton, en los primeros minutos, produce elevados porcentajes de remoción de la DQO, sin embargo, a medida que va pasando el tiempo, se producen reacciones secundarias indeseadas que no contribuyen a la oxidación.

Ghosh, et al. (2010) en trabajos realizados en remoción de DQO, en aguas residuales de la industria petroquímica, donde el valor de DQO alcanzado fue de 11,500 mgO<sub>2</sub>/L, manifiesta, que en el proceso Fenton, puede producirse la recombinación de radicales oxhidrilos (OH<sup>•</sup>) y/o la reacción de éstos con radicales perhidroxilo (HO<sub>2</sub><sup>•</sup>), traduciéndose en la reducción del rendimiento de remoción de la DQO en el proceso Fenton y esto se refleja en las siguientes reacciones:



Estas reacciones surgen debido al exceso de tiempo de contacto. (p. 1).

Como señalé anteriormente, la constante de cinética de la primera reacción, propuesta por Henry Fenton es 76.5 Lmol<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, con una gran generación de radicales OH<sup>•</sup>, actuando sobre los contaminantes orgánicos del efluente del camal como grasas, aceites, aminas, compuestos nitrogenados, fosforados, cloruros, productos lignocelulósicos, etc.

La actividad de los radicales OH<sup>•</sup>, está en función a la DQO inicial del efluente, para la muestra el valor de la DQO fue 11,500 ppm O<sub>2</sub>, este elevado valor, se manifiesta en las respuestas del porcentaje de remoción a medida que transcurrió el tiempo de contacto, disminuyendo sustancialmente hasta llegar a 3.95% en el cuarto tratamiento.

Por lo tanto, no es recomendable el empleo de tiempos largos para remover la DQO.

Se recomienda que además del empleo del reactivo de Fenton, es importante como pasos subsiguientes, la neutralización la floculación y la sedimentación. La disminución del pH ayuda a degradar la materia orgánica. Las muestras a analizar se agitan rápidamente a 80 a 400 rpm durante 30 segundos a 60 minutos, seguida de un aumento del pH a punto neutro. La neutralización es seguida por la floculación antes de la sedimentación. Después de la sedimentación, se analiza la DQO del sobrenadante, para medir el rendimiento del tratamiento. La determinación del lodo sedimentado, proporciona la contribución de la coagulación /floculación hacia la eliminación de compuestos orgánicos. (Kang y Hwang, 2000) citados por (Umar, Abdul y Yusoff, 2010, p. 2113)

#### **4.2.4. Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción del reactivo de Fenton (F x T) en la remoción del parámetro DQO**

Los resultados se presentan en la Tabla 19

Tabla 19: *Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción, en la remoción de la DQO*

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Sig.
F en T <sub>1</sub>	2	407.86	203.93	2494.99	3.40	*
F en T <sub>2</sub>	2	24.35	12.17	148.93	3.40	*
F en T <sub>3</sub>	2	315.77	157.89	1931.63	3.40	*
F en T <sub>4</sub>	2	43.15	21.58	263.96	3.40	*
T en F <sub>1</sub>	3	5649.72	1883.24	23040.33	3.01	*
T en F <sub>2</sub>	3	7657.21	2552.40	31227.15	3.01	*
T en F <sub>3</sub>	3	9215.28	3071.76	37581.18	3.01	*
Error Exp.	24	1.96	0.08			

F.V. : Fuente de variabilidad, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado, Signific.: significancia

De la Tabla 19, para la remoción de la DQO se observó, que tanto los efectos simples del factor dosis de Fenton (F) sobre los niveles del factor tiempo (T) y viceversa son significativos; es decir, la interacción (efecto de los tratamientos) también resultó ser

significativa. Se muestra una significancia (P) de 0.05, hallándose una única dosis con su respectivo tiempo de reacción que predomina sobre las demás, viéndose reflejada en los porcentajes de remoción de las variables de respuesta.

#### 4.3. Resultado del porcentaje de remoción del parámetro turbiedad

$$\% \text{ Remoción turbiedad} = \left( \frac{400.70 - 174}{400.70} \right) \times 100 = 56.58 \%$$

Los demás resultados los podemos observar Tabla 20

Tabla 20: *Resultados del porcentaje de remoción de la turbiedad*

Tratamientos	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
1	R <sub>1</sub>	56.58	53.58	56.83	58.82
	R <sub>2</sub>	56.83	53.33	56.58	58.32
	R <sub>3</sub>	57.08	53.58	56.58	58.32
2	R <sub>1</sub>	58.32	40.60	42.85	41.35
	R <sub>2</sub>	58.32	40.35	43.10	40.85
	R <sub>3</sub>	58.07	40.60	42.85	40.85
3	R <sub>1</sub>	29.87	30.62	45.10	52.08
	R <sub>2</sub>	29.62	30.37	44.85	51.83
	R <sub>3</sub>	29.62	30.12	44.60	51.58

R<sub>1</sub>: repetición 1, R<sub>2</sub>: repetición 2, R<sub>3</sub>: repetición 3

#### 4.3.1. Resultado en el análisis de varianza en la remoción del parámetro turbiedad

Tabla 21: *Análisis de varianza parámetro turbiedad*

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Significancia
trat.	11	3564.55	324.05	7204.10	2.22	*
F	2	1805.85	902.93	20073.38	3.40	*
T	3	408.69	136.23	3028.56	3.01	*
FT	6	1350.01	225.00	5002.10	2.51	*
Error Exp.	24	1.08	0.04			
Total	35	3565.63				

F.V. : Fuente de variabilidad, Tratam. : Tratamiento, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, FT: interacción, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado, Signific.: significancia. Error Exp.: Error Experimental

Coefficiente de varianza : 2.33

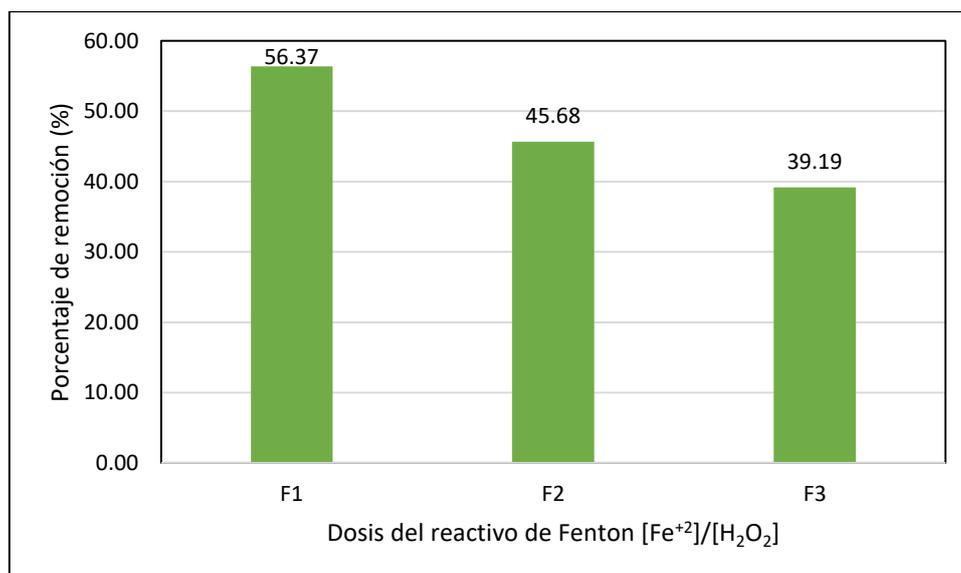
La tabla anterior muestra que existe diferencia significativa entre los tratamientos y también entre los factores, por lo que, conlleva a un rechazo de la hipótesis nula, para el parámetro turbiedad.

#### 4.3.2. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05, para efectos principales del factor dosis del reactivo de Fenton (F) en la remoción del parámetro turbiedad

Los resultados se presentan en la Tabla 22

Tabla 22: Prueba Duncan para estimar el mejor tratamiento en función a la dosis Fenton

F	Medias	Mejor tratamiento
F1	56.37	A
F2	45.68	B
F3	39.19	C

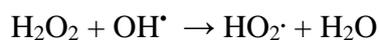


F: Dosis Fenton, F1: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.2$ , F2: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.4$ , F3: Dosis Fenton relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.6$ .

Figura 15. Efecto de la dosificación del reactivo de Fenton remoción de la turbiedad

De la Tabla 22 y la Figura 15, se observó que el mejor porcentaje de remoción se obtuvo con la menor dosis Fenton, cuando la relación  $[Fe^{+2}]/[H_2O_2] = 0.2$  y el volumen empleado de peróxido de hidrógeno al 30 % es 12.50 ml.

Ghosh et al., (2010), citado por Rubio-Clemente, A., Chica E., Peñuela, G. (2014), indican que un exceso de  $H_2O_2$  y/o de iones de hierro al inicio del proceso, respecto de la cantidad de contaminante a tratar, limita la eficiencia del mismo.



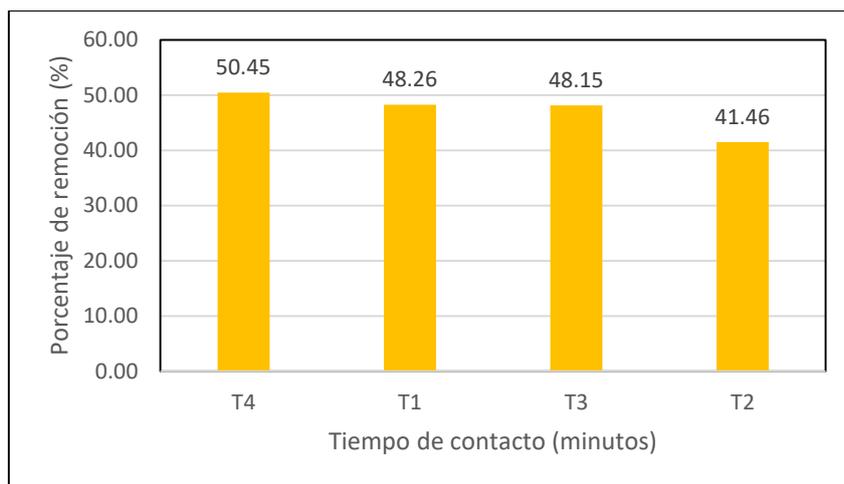
Es por eso que el porcentaje de remoción de la turbiedad disminuye si se agrega mayor cantidad de peróxido de hidrógeno, o se aumenta la cantidad de catalizador sulfato ferroso

#### **4.3.3. Prueba Duncan a un nivel de significancia de 0.05 para efectos principales del factor tiempo de reacción (T) del reactivo de Fenton en la remoción del parámetro turbiedad**

Los resultados se presentan en la Tabla 23

Tabla 23: *Prueba Duncan mejor tratamiento del tiempo de contacto en la remoción de la turbiedad*

T	Medias	Mejor tratamiento
T4	50.45	A
T1	48.26	B
T3	48.15	C
T2	41.46	D



T: Tiempo de reacción, T4: Tiempo de reacción 4 (120 minutos), T2: Tiempo de reacción 2 ( 60 minutos), T3: Tiempo de reacción 3 ( 90 minutos), T1: Tiempo de reacción 1 ( 30 minutos)

Figura 16. *Efecto del tiempo de contacto del reactivo de Fenton en la remoción de la turbiedad*

De la Tabla 23 y la Figura 16, podemos observar que a los 120 minutos se remueve el 50.45% de la turbiedad, también observamos que trabajar a los 30 minutos y a los 60 minutos es indistinto ya que se logra remover casi el mismo porcentaje.

Es posible que la sedimentación de moléculas formadas por los radicales producidos y los compuestos orgánicos que se encuentran en el efluente, sean de elevado peso molecular como grasas y aceites favoreciendo su precipitación, por lo tanto, incrementando el porcentaje de remoción de la turbiedad

Söylemez y von Sontag (1980) citado por Pliego (2012) manifiestan que, el comportamiento de la turbidez en función al tiempo, es debido a que una vez que se han generado los radicales  $\cdot\text{OH}$ , estos reaccionan de forma muy rápida con la materia orgánica, los radicales  $\cdot\text{OH}$  puede reaccionar a través de tres tipos diferentes de reacciones radicáticas: reacción de adición del radical hidroxilo, eliminación de un átomo de hidrógeno y transferencia de electrones. manifiestan que el tipo de ruta depende de los grupos funcionales de las moléculas presentes en el agua. Sievers (2011) citado por Pliego (2012) señalan que, la reacción de eliminación de un átomo de hidrógeno es despreciable

cuando hay en el medio dobles en enlaces del tipo C=C y C=N mientras que la ruta basada en de transferencia de electrones es más favorable cuando los potenciales sitios para la adición del OH<sup>•</sup> están ocupados por halógenos (p. 15).

Figueroa y Zambrano (2018) manifiestan que tratando agua residual procedente de la cartonería con el reactivo de Fenton, lograron disminuir la turbidez de 9920 NTU hasta 130 NTU, obtuvieron 98% de remoción, ya que posteriormente al proceso Fenton realizaron neutralización con hidróxido de sodio y filtración de lodos (p. 34).

Es importante conocer la dosis adecuada ya que, como lo manifiesta Ito et al. (1998) citado por Salas (2010) la concentración residual de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> que permanece en el medio después del tratamiento aporta toxicidad, obligando a ajustar convenientemente la dosis de peróxido de hidrógeno empleada, de forma que el efluente tratado no exceda los límites de vertido establecidos para dicho indicador (p. 36).

#### **4.3.4. Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de contacto del reactivo de Fenton (F x T) en la remoción del parámetro turbiedad**

Los resultados se presentan en la Tabla 24

Tabla 24: *Prueba Duncan interacciones de los factores dosis del reactivo de Fenton versus tiempo de reacción en la remoción del parámetro turbiedad*

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F.T	Sig.
F en T1	2	1551.61	775.80	17247.23	3.40	*
F en T2	2	806.23	403.12	8961.85	3.40	*
F en T3	2	331.60	165.80	3686.00	3.40	*
F en T4	2	466.42	233.21	5184.62	3.40	*
T en F1	3	39.09	13.03	289.69	3.01	*
T en F2	3	640.88	213.63	4749.23	3.01	*
T en F3	3	1078.72	359.57	7993.85	3.01	*
Error Exp.	24	1.08	0.04			

F.V. : Fuente de variabilidad, F: Dosis Fenton, T: Tiempo, G.L.: grados de libertad, S.C.: suma de cuadrados, C.M.: cuadrado medio, F.C.: Fisher calculado, F.T.: Fisher tabulado, Signific.: significancia

De la Tabla 24, para la remoción de la turbiedad, se observa que tanto los efectos simples del factor dosis de Fenton (F) sobre los niveles del factor tiempo (T) y viceversa son significativos; es decir, la interacción (efecto de los tratamientos) también resultó ser significativa. Se muestra una significancia (P) de 0.05, hallándose una única dosis con su respectivo tiempo de reacción que predomina sobre las demás, viéndose reflejada en los porcentajes de remoción de las variables de respuesta. Es decir, el mejor tratamiento es aquel cuyo promedio de remoción está por encima de los demás, tanto para la dosis como para el tiempo.

Cabe señalar que el alcance de la investigación, no contempló procesos como sedimentación, neutralización y filtración, lo cual elevaría el porcentaje de remoción de los parámetros evaluados. Se recomienda realizar test de jarras, que aproximaría a valores de dosificación más adecuados

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES

1. Los valores obtenidos al caracterizar los parámetros de color, demanda química de oxígeno y turbiedad del efluente líquido del camal “Regulo Bernal Torres”, nos indican que se trató de un agua residual con elevado color (51,400 UCV-Pt, Co), alta concentración de demanda química de oxígeno (9,813 mgO<sub>2</sub>/L) y elevada turbiedad (400.7 NTU)
2. El mayor porcentaje de remoción de color fue 92.08% y se logró con la dosis de reactivo de Fenton, cuyas características son:  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.6$ , la cual empleó 37.52 ml de peróxido de hidrógeno al 30 % y 1 gramo de catalizador sulfato ferroso.
3. El mayor porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno es 32.24% y se logró con la dosificación, cuyas características son:  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.4$ , la cual empleó 25.01 ml de peróxido de hidrógeno al 30 % y 1 gramo de catalizador sulfato ferroso.
4. El mayor porcentaje de remoción de la turbiedad es 56.37% y se logró con la dosificación cuyas características son  $[\text{Fe}^{+2}]/[\text{H}_2\text{O}_2] = 0.2$  y el volumen de peróxido de hidrógeno al 30 % que se empleó fue de 12.50 ml.
5. El mejor porcentaje de eficiencia de remoción del color fue de 90.57%, se logró a los 120 minutos, este valor es menor comparado con la remoción debido al efecto de la dosificación
6. El mejor porcentaje de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno que fue 54.80%, se logró a los 30 minutos, este valor es mayor, comparado con la remoción debido al efecto de la dosificación
7. El mejor porcentaje de eficiencia de remoción de la turbiedad que fue de 50.54%, se logró a los 120 minutos, este valor es menor. comparado con la remoción debido a la mejor dosis

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1.- Andrade, J. (2008) Escuela de Organización Industrial. Master Profesional en Ingeniería y Gestión Ambiental. Pág. 8. Sevilla- España.
- 2.- Alva, C. (2011) Instrumentos ambientales aplicados a los recursos hídricos en el marco de la política ambiental. Curso: caudales ambientales ecológicos. Dirección general de calidad ambiental. Pág. 3. Viceministerio de gestión ambiental. Ministerio de ambiente.
- 3.- Aznate, L. Cerro, O. y Orozco, A. (2013) Degradación por fotocátalisis homogénea (foto-Fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol. Universidad de Cartagena facultad de ingeniería programa ingeniería química Cartagena de indias d.t. y c. Pág. 27. Cartagena de Indias-Colombia.
- 4.- Bacardi, J. (2007). "Coupled photochemical-biological system to treat biorecalcitrant wastewaters." Universitat de Barcelona.
- 5.- Barbusiński, K. (2009) Fenton reaction - controversy concerning the Chemistry Revista: Ecological chemistry and engineerings. Volumen 16, N°3, Pág. 348, 349.
- 6.- Becerra, M. y Cadena, S. (2016) Evaluación de la aplicación del método Fenton a nivel laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa aguas San Juan S.A.S. ESP. Tesis Título de Ingeniero Químico. Fundación Universidad de América Facultad de Ingenierías Programa Ingeniería Química Bogotá D.C. Pág. 18, 28. Bogotá Colombia.
- 7.- Becerra, L., Horna, M. y Barrionuevo, K. (2014) Nivel de Contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región La Libertad. Revista del Cuerpo Médico. Versión impresa ISSN: 2225-5109. Versión electrónica ISSN: 2227-4731 Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo, Volumen 7 (3) julio-setiembre-2014. Pág. 23. Chiclayo Perú.

- 8.- Botelho, D., Cleto, E. y Rodríguez, T., (2008) Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. Revista de la Universidad de Antioquia N° 46 Pág. 29, 30. Antioquia-Colombia.
- 9.- Bocanegra, F. (1999) Bases metodológicas de la investigación científica. Universidad Nacional de Trujillo. Pág. 64. Publicado por PubliCiencia, San Francisco Solano 354. Urbanización san Andrés Trujillo-Perú.
- 10.- Castro, M. y Vinuesa, M. (2011) Manual para el manejo adecuado de los residuos sólidos generados por el canal municipal de Riobamba. Tesis de Grado. Facultad de ciencias escuela de ciencias químicas y ambientales. Escuela técnica de Chimborazo. Pág. 18. Riobamba. Ecuador.
- 11.- CIMPAR (2010) Comisión Público Privada de Sustentabilidad ambiental Buenas prácticas ambientales en la industria cárnica. Municipalidad de Rosario. Provincia de Santa Fe-Argentina.
- 12.- Coa, L. (2016) Propuesta de diseño de una planta de faenamiento y procesamiento de carne en el distrito de Cabanilla provincia Lampa región Puno. Universidad Nacional del Altiplano. Pág. 23 Puno-Perú.
- 13.- Cruz, A. y Sierra, C (2016) Propuesta de una alternativa de tratamiento de aguas residuales, en la salsamentaría El Bohemio. Fundación Universitaria de América, Facultad de Ingeniería Química. Página Bogotá. Pág. 128- Colombia.
- 14.- Cruz, L. (2015) Influencia del beneficio de los semovientes en la calidad microbiológica de las carnes comercializadas en la ciudad de Tacna. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann –Tacna. Tesis maestría en ciencias de los alimentos. Pág. 53. Tacna Perú.

- 15.- Chang, R. (1997) Química. Capítulo elementos no metálicos y sus compuestos. Cuarta edición, ISBN 84-481-0816-7. Editorial Mc Graw Hill. Pág. 891. Impreso en España.
- 16.- Chica, E., Peñuela, G. y Rubio, A. (2014) Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. Revista Ingeniería y Competitividad, Volumen 16, No. 2, pág. 213, 216. Medellín-Colombia.
- 17.- DEQ. (2017) Departamento de calidad ambiental. Hoja informativa. Oregon- Estados Unidos. Pág. 1.
- 18.- Domènech, X. y Jardim, W. (2002). Procesos Avanzados de Oxidación para la eliminación de contaminantes. CYTED.
- 19.- Dussan, J. *et al.* (2009). Aproximaciones biológicas y fisicoquímicas en el tratamiento de contaminantes: un resumen del aporte de la Universidad de los Andes. Pág., 1. Revista de ingeniería. Bogotá-Colombia.
- 20.- Durán-Moreno, *et al.* (2011). Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process. Journal of Hazardous Materials 186, 1652–1659.
- 21.- Espinoza, J. (2011). Tratamiento de aguas residuales de matadero con elevado contenido en sangre mediante la combinación de procesos anaerobio de película fija (bapf) y aerobio de membrana (mbr). Tesis Doctoral. Universidad de Burgos. Área: Ingeniería Química. (p. 9 y 10). Burgos- España.
- 22.-Espigares, M, y Fernándezcrehuet, M. (1999) Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos. En Estudio sanitario del agua. Pérez López. J. A. y Espigares García M. Editorial Universidad de Granada, Granada, Pág. 85-114 España

- 23.- Fernández (2008) Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales a bajo costo para la localidad de Guelatao de Juárez, Oaxaca (México). Pág. 88 Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Montes. Madrid-España.
- 24.- Figuero, F y Zambrano, G. (2018) Tratamiento por oxidación avanzada (reacción de Fenton) en aguas residuales de una industria cartonera. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química. Guayaquil Ecuador.
- 25.- Forero, J., Ortiz, O. y Ríos, F. (2005) Aplicación de procesos de oxidación avanzada, como tratamiento del fenol, en aguas residuales. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro- Vol. 3 Número 1 diciembre 2005. Ecopetrol S.A.- Instituto Colombiano del Petróleo. Universidad industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Pág. 97. Bucaramanga, Santander Colombia.
- 26.- Pliego, G. (2012) Intensificación del proceso Fenton para el tratamiento de aguas residuales industriales. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias. Sección Ingeniería Química. Tesis Doctoral Madrid España. Pág. 16
- 27.- GMTDES.C.(2005) Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector cárnico. Ministerio de Ambiente. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio del Medio Ambiente. Pág. 68. I.S.B.N.MMA. 84-8320-326-X. Edita Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio Ambiental.
- 28.- GilPavas, E. (2011) Cuaderno de investigación. Procesos avanzados de oxidación, para el tratamiento de residuos líquidos peligrosos procedentes de los laboratorios de Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT. Pág. 17 Grupo de investigación en procesos ambientales y biotecnológicos. Grupo de investigación en ISSN 1692-0694 Medellín-Colombia.

- 29.- Guerrero E., Ramirez F. (2004) Manejo ambiental de residuos en mataderos de pequeños municipios *Scientia Et Technica*, vol. X, núm. 26, diciembre, 2004, pp. 199-204 Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia.
- 30.- Ghosh, P., Samanta, A. y Ray, S. (2010). COD Reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Volumen 88. Pág. 1021-1026. 2010 Sociedad Canadiense de Ingeniería Química DOI 10.1002 /cjce.20353. Publicado en Internet el 30 junio de 2010 en Wiley Online Library.
- 31.- Homem, *et al.* (2009). Preliminary feasibility study of benzo ( $\alpha$ ) pyrene oxidative degradation by Fenton treatment. *Journal of Environmental and Public Health* 2009, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Pág 3. Porto – Portugal
- 32.- Leandro, M. (2004) 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*, 4: 72-82 (2004).
- 33.-Legrini, O., Oliveros, E. y Braun, A. (1993) Tratamiento de aguas utilizando procesos fotoquímico. *Chem. Rev.*, 1993, 93 (2), Pág. 671–698.
- 34.- Malicová, P. Hajduková , J. y Nezvalova, L. (2009) Oxidación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por reacción de Fenton. Universidad Técnica de Tecnología. *Revista de Ingeniería geociencia*. LV volumen (2009), No.4. Pág. 23-28, ISSN 1802-5420. Orstrava – Poruba- República Checa.
- 35.- Martínez, G. (2010) Descontaminación de agua de lavado de suelo contaminado con plaguicidas mediante procesos avanzados de oxidación. Tesis Licenciatura. Química.

Departamento de Ciencias Químico Biológicas, Escuela de Ciencias, Universidad de las Américas Puebla. Abril. Pág. 31, 32 y 33. Derechos Reservados. Puebla-México.

36.- McFarland, M. y Dozier, M. (2001) Instituto de Recursos de Agua de Texas. Pág. 1 Sistema Universitario Texas A&M. L5451S2-04.

37.- Méndez, R. et al (2010) Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. Revista Ingeniería e Investigación. Volumen 30, N°1, Pág. 80-85. Península de Yucatán – México.

38.- Méndez, R. et al (2010) Determinación de la dosis óptima de reactivo Fenton en un tratamiento de lixiviados por Fenton-adsorción. Rev. Int. Contam. Ambie. 26 (3) 211-220, 2010. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. Av. Industrias No Contaminantes por Periférico. Norte, s/n. Tablaje Catastral 12685. Mérida, Yucatán, México.

39.- MINAGRI (2010) Guía de Monitoreo Ambiental en el Sector Agrario. Pág. 23.

40.- Munter, R. (2001) Advanced oxidation processes – current status and prospects. Revista del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Tallin Estonia. Pág. 60 y 61. Tallin- Estonia.

41.-Umar, M., Abdul, H. y Yusoff, S. (2010) Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. Waste Management. Volumen 30. Noviembre 2010, Pág. 2113- 2121

42.- Neyens, E., y Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. Journal of Hazardous Materials 98 (1-3), 33, 34, 50.

43.- Niño, C. (2015). Propuesta de un sistema de gestión ambiental basado en la norma iso 14001:2004 para el matadero municipal de la ciudad de Lambayeque. Tesis para optar

- el título de Ingeniero industrial. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Pág. 25. Chiclayo –Perú.
- 44.- Pignatello, J. (2006). Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 36 (1), Pág. 2,8.
- 45.- Perry, R., Green, D. y Maloney, J. (1994) Manual del Ingeniero Químico. Tomo I. Sección III Datos fisicoquímicos. Densidad de soluciones acuosas inorgánicas. Tabla3-59. Pág. 101. Sexta edición. Editorial Mac Graw Hill. Estados Unidos.
- 46.- Romero, M. *et al.* (2009) Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Pág. 1. Versión impresa ISSN 0188-4999 Volumen 25 N°3. México - agosto 2009.
- 47.- Romero, J. (2004) Calidad del agua, Tercera edición. Pág.109, 186. Editorial escuela colombiana de ingeniería. ISBN 978-958-8060-83-5. Impreso en Colombia
- 48.- Rodríguez J. y Durán de Bazúa C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol. Ciencia Ed.* 21, 25–33.
- 49.-RSFAA (2009) Reglamento Sanitario de Faenado de Animales de Abasto. Pág. 26. SENASA.
- 50.- Rubio, A., Chica, E. Peñuela, G. (2014) Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Revista Ingeniería y Competitividad* Volumen 16, N°2, p. 211-223(2014) Medellín-Colombia
- 51.- Salas, G. (2010) Tratamiento por oxidación avanzada (Reacción de Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*.

Facultad de Química e Ingeniería Química Universidad Nacional Mayor de San Marco.  
Volumen 13 N° 1, año 2010, Pág. 30-38 Lima Perú.

52.- Salas, G. y Condorhuaman, C (2008) Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química. Facultad de Química e Ingeniería Química Universidad Nacional Mayor de San Marco. Volumen 11 N° 1, año 2008, Pág. 29-35 Lima Perú.

53.- Sampieri, R. (2014) Metodología de la Investigación. p. 122. Sexta edición. Editorial Mc Graw Hill. Impreso en México

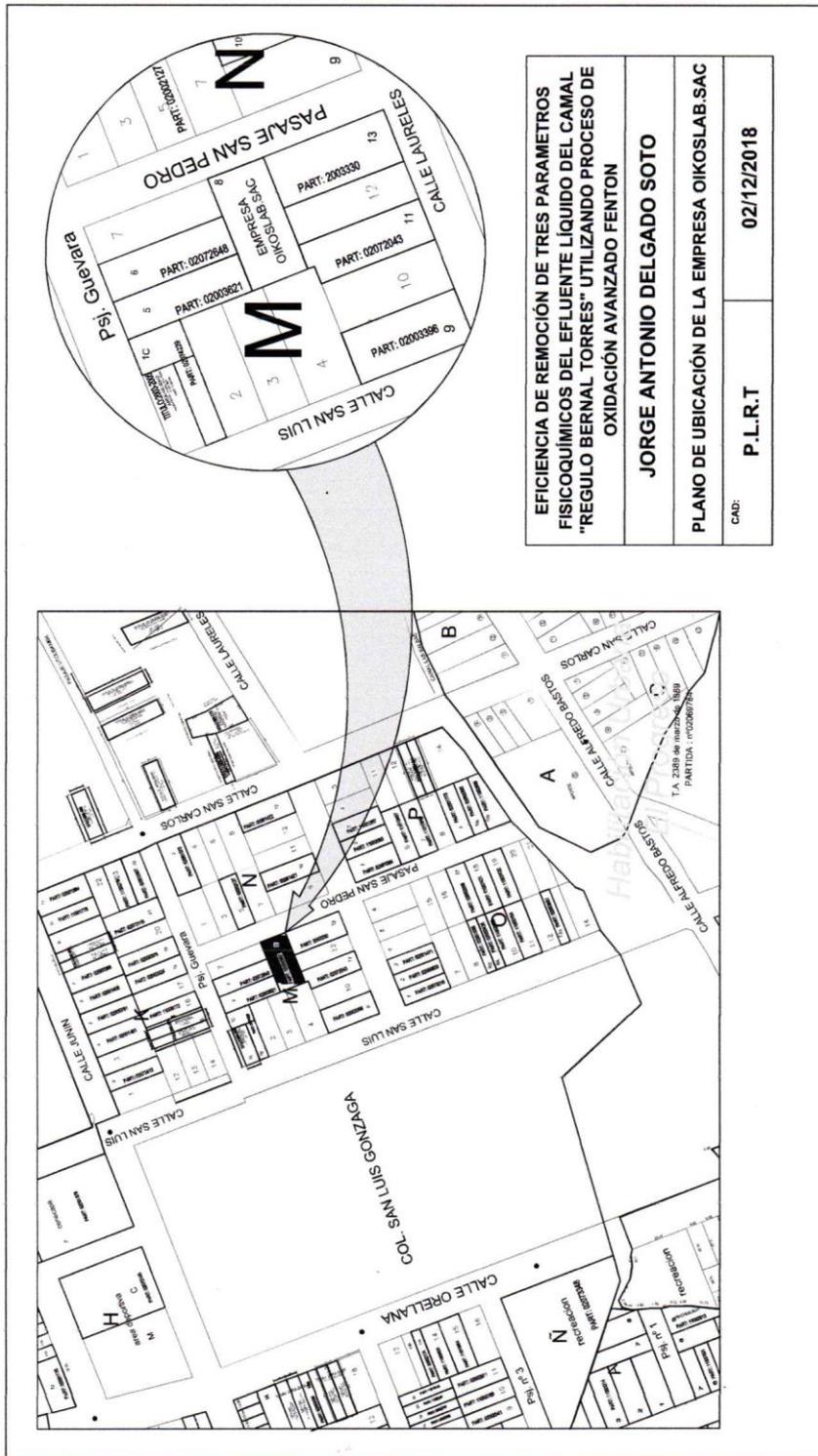
54.- SENAMHI (2007) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Dirección general de hidrología de los recursos hídricos. Monitoreo de calidad de aguas superficiales del Perú. Pág.1, 8. Lima-Perú.

55.- Terán, M. (2016) Estudio de la aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada a Aguas Contaminadas. Tesis de Grado de Ingeniería Química. Escola Universitaria de Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona. Universidad Técnica de Catalunya. Pág. 23  
Director: Montserrat Pérez Moya. Departamento de Ingeniería Química. Barcelona-España.

# CAPÍTULO VII

## ANEXOS

Anexo1. Plano de ubicación del laboratorio Oikoslab S.A.C



Anexo 2. Solicitud de ingreso al camal municipal Regulo Bernal Torres



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

“Año del Dialogo y la Reconciliación Nacional”

Solicito ingreso al camal municipal  
para muestreo de aguas residuales

Adm. ENRIQUE VENTURA SANCHEZ

Señor Administrador del Camal Municipal “Regulo Bernal Torres”

Ante Usted y con el debido me presento para exponerle lo siguiente:

Que, a la fecha, mi persona se encuentra cursando la maestría de gestión ambiental de la Universidad Nacional de Cajamarca, y siendo requisito para la obtención del grado académico de maestro, la presentación de un trabajo de investigación es que recorro a su digno despacho puesto que la investigación que estoy realizando está relacionada con el tratamiento de aguas residuales provenientes del camal.

Mi proyecto de investigación aprobado por RESOLUCIÓN DE COORDINACIÓN DE ESCUELA N°1728-EPG-UNC, DEL 11 DE JUNIO DEL 2018, lleva por titulo:

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TRES PARAMETROS FISICOQUÍMICOS DEL EFLUENTE

LÍQUIDO DEL CAMAL “REGULO BERNAL TORRES” UTILIZANDO PROCESO DE

OXIDACIÓN AVANZADO FENTON.

Es por esta razón que le pido por favor me facilite el ingreso a la planta de beneficiado a realizar la toma de muestra el día 31 de agosto del presente en horas 9 am.

Sin otro en particular me despido de Usted, agradeciéndole la atención que tenga al presente documento.

  
 Mg. Ing. Jorge A. Delgado Soto  
DOCENTE  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

Jaén 29 de Agosto del 2018

### Anexo 3. Informe de caracterización del agua residual del camal municipal



ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO  
DE SUELOS Y AGUAS

**OIKOSLAB**  
SOC

**ENSAYO DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°1473-2018**

Fecha de recepción	:	30-08-2018
Responsable del ensayo	:	Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto
Institución	:	Universidad Nacional de Cajamarca
Unidad	:	Posgrado
Escuela	:	Ciencias Agrarias
Mención	:	Gestión Ambiental
Título de la Investigación	:	

**Eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente líquido del camal “Regulo Bernal Torres” utilizando proceso de oxidación avanzado Fenton**

**I.- Datos de la muestra**

Ubicación	:	Camal municipal “Regulo Bernal Torres
Tipo de muestra	:	Efluente líquido proveniente del pozo sedimentador
Distrito	:	Jaén
Provincia	:	Jaén
Región	:	Cajamarca

**II.- Datos del ensayo**

Tipo	:	Caracterización química y fisicoquímica del efluente líquido
------	---	--

**III. Descripción de las metodologías empleadas**

**Medición de amonio**  
Lectura directa con el fotocolorímetro marca HANNA HI83225, utiliza lámpara de tungsteno con filtro de interferencias de banda estrecha a 420 nm. El método es una adaptación del método de Nessler D1426-92 del Manual de aguas y tecnología medioambiental de ASTM. La reacción entre el amoníaco y los reactivos origina una coloración amarilla en la muestra. Utilizando los reactivos específicos para determinación de N-NH<sub>3</sub> HI 93715A-0 y 93715B-0

**Medición de amoníaco**  
Lectura directa con el fotocolorímetro marca HANNA HI83225, utiliza lámpara de tungsteno con filtro de interferencias de banda estrecha a 420 nm. El método es una adaptación del método de Nessler D1426-92 del Manual de aguas y tecnología medioambiental de ASTM. La reacción entre el amoníaco y los reactivos origina una coloración amarilla en la muestra. Utilizando los reactivos específicos para determinación de N-NH<sub>3</sub> HI 93715A-0 y 93715B-0

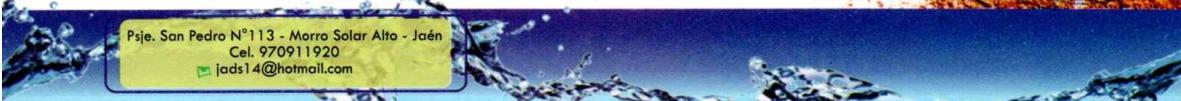
**Medición del Color**  
Método Estándar Platino-Cobalto espectrofotométrico, adaptado al National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). Norma: SMEWW. Ed.20 (2120C) modificado

**Medición de conductividad eléctrica**  
Medición utilizando el equipo multiparámetro marca HANNA HI-2550, calibrado con solución HI7030, 1288S µ/cm. Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 22nd Ed. (Incluye Muestreo). Título Conductivity. Laboratory Method

**Medición de la demanda química de oxígeno**  
Reflujo cerrado. Digestión a 160 °C por 2 horas. Valoración utilizando Sulfato Ferroso Amoniacal (Sal de Mohr). la DQO con relación. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed.

**Medición de fósforo**  
Se mide en rango bajo utilizando fotómetro marca HANNA HI 83225, que utiliza como fuente de luz una lámpara de tungsteno con filtro de interferencias de banda estrecha a 525 nm. Método adaptado del Método amino ácido del Método Estándar, para el análisis de aguas y aguas residuales 18 edición. La reacción entre el fósforo y los reactivos causa una coloración azul en la muestra. Utiliza reactivos HI 93706-01. Reactivo Molibdato y HI 93706 B-0 Amino ácido en Polvo.

Psje. San Pedro N°113 - Morro Salar Alto - Jaén  
Cel. 970911920  
jads14@hotmail.com





ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO  
DE SUELOS Y AGUAS

**OIKOSLAB**  
SAC

#### Medición de Nitratos

Fotómetro Equipo HANNA.HI 83225. Lectura directa. Utilizando reactivos HI 93728-01. Rango 0 a 300 mg/L. Resolución de 5 mg/L. Lectura con lámpara de tungsteno con filtro de interferencia a 525 nm. Adaptación del método de reducción por cadmio. La reacción entre el nitrógeno y el nitrato origina una coloración amarilla en la muestra.

#### Medición de la turbiedad

Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 22nd Ed Turbidity. Título: Nephelometric Method.

#### Potencial de iones hidrógenos (pH)

Medición directa con el equipo multiparámetro marca HANNA HI-2550, previamente calibrado en tres puntos con los Buffers HI 70004P (pH 4.01), HI 70007P (pH 7.01) y HI 70010 (pH 10.01). Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H<sup>+</sup> B, 22nd Ed. (Incluye muestreo). Título: pH Value. Electrometric Method.

#### Sólidos totales en suspensión

Método fotométrico. Adapted from Sewage and industrial Wastes, 31,1159(1959). SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 22nd Ed

#### III.- Resultados

Parámetros	Unidades	Resultados
Color	UCV-Pt-Co	51,400.0
Conductividad eléctrica	μS/cm	1,067.0
Cloruro de sodio	%NaCl	1.9
Demanda Química de oxígeno	mgO <sub>2</sub> /L	9,813.0
Nitratos	mgNO <sub>3</sub> /L	18,000.0
Nitrógeno como nitratos	mgN-NO <sub>3</sub> /L	40.00
Nitrógeno amoniacal	mgN-NH <sub>3</sub> /L	3,400.0
Amoniacal	mgNH <sub>3</sub> /L	4,100.0
Amonio	mgNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L	4,400.0
pH	unidades de pH	6.7
Fósforo	mgP/L	1,200.0
Fósforo como fosfato	mgP-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> /L	3,800.0
Sólidos totales en suspensión	mgSTS/L	900.0
Turbiedad	NTU	400.7

  
Jorge A. Delgado Soto  
ING. QUÍMICO CIP. 56757  
GERENTE GENERAL



Psje. San Pedro N°113 - Morro Salar Alto - Jaén  
Cel. 970911920  
jads14@hotmail.com

Anexo 4. Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro color



**ENSAYO DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°1474-2018**

Fecha de recepción : 30-08-2018  
 Responsable del ensayo : Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto  
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca  
 Unidad : Posgrado  
 Escuela : Ciencias Agrarias  
 Mención : Gestión Ambiental  
 Título de la Investigación :  
 Eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente líquido del camal "Regulo Bernal Torres" utilizando proceso de oxidación avanzado Fenton

I - Datos de la muestra

Ubicación : Camal municipal "Regulo Bernal Torres"  
 Tipo de muestra : Efluente líquido proveniente del pozo sedimentador  
 Distrito : Jaén  
 Provincia : Jaén  
 Región : Cajamarca

II - Datos del ensayo

Tipo : Medición del color  
 Metodología empleada : Método Estándar Platino-Cobalto espectrofotométrico, adaptado al National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). Norma: SMEWW. Ed.20 (2120C) modificado.

III - Resultados

Dosis	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
0.2	R1	5,600.00	6,600.00	5,500.00	6,200.00
	R2	5,450.00	6,570.00	5,800.00	6,000.00
	R3	5,550.00	6,750.00	6,050.00	6,430.00
0.4	R1	7,300.00	5,500.00	6,500.00	6,520.00
	R2	7,150.00	5,580.00	6,540.00	6,490.00
	R3	7,050.00	5,470.00	6,480.00	6,560.00
0.6	R1	6,750.00	2,700.00	5,700.00	1,200.00
	R2	6,770.00	2,650.00	5,770.00	1,150.00
	R3	6,700.00	2,500.00	5,740.00	1,240.00

**Jorge A. Delgado Soto**  
 ING. RESPONSABLE  
 CIP. 56757



Anexo 5. Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro DQO



**ENSAYO DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°1475-2018**

Fecha de recepción : 30-08-2018  
 Responsable del ensayo : Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto  
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca  
 Unidad : Posgrado  
 Escuela : Ciencias Agrarias  
 Mención : Gestión Ambiental  
 Título de la Investigación :  
 Eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente líquido del camal "Regulo Bernal Torres" utilizando proceso de oxidación avanzado Fenton

**I.- Datos de la muestra**

Ubicación : Camal municipal "Regulo Bernal Torres"  
 Tipo de muestra : Efluente líquido proveniente del pozo sedimentador  
 Distrito : Jaén  
 Provincia : Jaén  
 Región : Cajamarca

**II.- Datos del ensayo**

Tipo : Determinación de la demanda química de oxígeno  
 Metodología empleada : Reflujo cerrado. Digestión a 160 °C por 2 horas.  
 Valoración utilizando Sulfato Ferroso Amoniacal (Sal de Mohr). la DQO con relación. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed.

**III.- Resultados**

Dosis	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
0.2	R1	3,800.00	7,900.00	8,200.00	9,500.00
	R2	3,830.00	7,860.00	8,090.00	9,540.00
	R3	3,780.00	7,880.00	8,140.00	9,470.00
0.4	R1	2,390.00	5,400.00	9,700.00	9,000.00
	R2	2,415.00	5,430.00	9,650.00	9,070.00
	R3	2,360.00	5,380.00	9,690.00	9,308.00
0.6	R1	7,147.00	6,787.00	7,506.00	9,627.00
	R2	7,122.00	6,810.00	7,492.00	9,644.00
	R3	7,077.00	6,790.00	7,465.00	9,670.00

**Jorge A. Delgado Soto**  
 ING. RESPONSABLE  
 CIP. 56757



Anexo 6. Informe de los resultados de las mediciones de los tratamientos y repeticiones de las muestras para el parámetro turbiedad



**ENSAYO DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°1476-2018**

Fecha de recepción : 30-08-2018  
 Responsable del ensayo : Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto  
 Institución : Universidad Nacional de Cajamarca  
 Unidad : Posgrado  
 Escuela : Ciencias Agrarias  
 Mención : Gestión Ambiental  
 Título de la Investigación :

Eficiencia de remoción de tres parámetros fisicoquímicos del efluente líquido del camal "Regulo Bernal Torres" utilizando proceso de oxidación avanzado Fenton

I.- Datos de la muestra

Ubicación : Camal municipal "Regulo Bernal Torres"  
 Tipo de muestra : Efluente líquido proveniente del pozo sedimentador  
 Distrito : Jaén  
 Provincia : Jaén  
 Región : Cajamarca

II.- Datos del ensayo

Tipo : Medición de la Turbiedad  
 Metodología empleada : Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B,  
 22nd Ed Turbidity. Título : Nephelometric Method.

III.- Resultados

Dosis	Repeticiones	Tiempo (min)			
		30	60	90	120
1	R1	174	186	173	165
	R2	173	187	174	167
	R3	172	186	174	167
2	R1	167	238	229	235
	R2	167	239	228	237
	R3	168	238	229	237
3	R1	281	278	220	192
	R2	282	279	221	193
	R3	282	280	222	194

**Jorge A. Delgado Soto**  
 ING. RESPONSABLE  
 CIP. 56757
 



Anexo 7. Análisis de varianza del parámetro color

Repetición	F1				F2				F3				Total
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	
1	89.11	87.16	89.30	87.94	85.80	89.30	87.35	87.32	86.87	94.75	88.91	97.67	Total
2	89.40	87.22	88.72	88.33	86.09	89.14	87.28	87.37	86.83	94.84	88.77	97.76	
3	89.20	86.87	88.23	87.49	86.28	89.36	87.39	87.24	86.96	95.14	88.83	97.59	
													3213.79
FT	267.70	261.25	266.25	263.75	258.17	267.80	262.02	261.93	260.66	284.73	266.52	293.02	Promedio
Promedio	89.23	87.08	88.75	87.92	86.06	89.27	87.34	87.31	86.89	94.91	88.84	97.67	89.27
F	1058.95				1049.92				1104.92				
T	786.54			813.77			794.79			818.70			

Prueba Duncan para efectos principales de los factores dosis Fenton (F) y tiempo (T)

Prueba Duncan	T1	T2	T3	T4	Promedio F
F1	89.23	87.08	88.75	87.92	88.25
F2	86.06	89.27	87.34	87.31	87.49
F3	86.89	94.91	88.84	97.67	92.08
Promedio T	87.39	90.42	88.31	90.97	

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

F	Medias
F3	92.08
F1	88.25
F2	87.49
Sx: 0.07	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
F3-F1	3.83	2	2.92	0.20	*
F3-F2	4.58	3	3.07	0.21	*
F1-F2	0.75	2	2.92	0.20	*

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor tiempo (T)

T	Medias
T4	90.97
T2	90.42
T3	88.31
T1	87.39
Sx: 0.08	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor tiempo (T)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
T4-T2	0.55	2	2.92	0.23	*
T4-T3	2.66	3	3.07	0.24	*
T4-T1	3.57	4	3.16	0.25	*
T2-T3	2.11	2	2.92	0.23	*
T2-T1	3.03	3	3.07	0.24	*
T3-T1	0.92	2	2.92	0.23	*

Anexo 8. Análisis de varianza del parámetro DQO

Repetición	F1				F2				F3				Total			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4				
1	61.28	19.49	16.44	3.19	75.64	44.97	1.15	8.28	27.17	30.84	23.51	1.90	941.08			
2	60.97	19.90	17.56	2.78	75.39	44.67	1.66	7.57	27.42	30.60	23.65	1.72				
3	61.48	19.70	17.05	3.50	75.95	45.17	1.25	5.15	27.88	30.81	23.93	1.46				
<b>FT</b>	183.73	59.10	51.04	9.47	226.98	134.81	4.07	21.00	82.47	92.24	71.09	5.07	<b>Promedio</b>			
<b>Promedio</b>	61.24	19.70	17.01	3.16	75.66	44.94	1.36	7.00	27.49	30.75	23.70	1.69	<b>26.14</b>			
<b>F</b>	303.33				386.86				250.88							
<b>T</b>	493.18				286.15				126.20					35.54		

Prueba Duncan para efectos principales del factor Dosis Fenton (F) y tiempo (T)

Prueba Duncan	T1	T2	T3	T4	Promedio F
F1	61.24	19.70	17.01	3.16	25.28
F2	75.66	44.94	1.36	7.00	32.24
F3	27.49	30.75	23.70	1.69	20.91
Promedio T	54.80	31.79	14.02	3.95	

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

F	Medias
F2	32.24
F1	25.28
F3	20.91
Sx : 0.16	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
F2-F1	6.96	2	2.92	0.47	*
F2-F3	11.33	3	3.07	0.49	*
F1-F3	4.37	2	2.92	0.47	*

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor tiempo (T)

T	Medias
T1	54.80
T2	31.79
T3	14.02
T4	3.95
Sx: 0.19	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor tiempo (T)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
T1-T2	23.00	2	2.92	0.54	*
T1-T3	40.78	3	3.07	0.57	*
T1-T4	50.85	4	3.16	0.59	*
T2-T3	17.77	2	2.92	0.54	*
T2-T4	27.85	3	3.07	0.57	*
T3-T4	10.07	2	2.92	0.54	*

Anexo 9. Análisis de varianza parámetro turbiedad

Repetición	F1				F2				F3				Suma Total
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	
1	56.58	53.58	56.83	58.82	58.32	40.60	42.85	41.35	29.87	30.62	45.10	52.08	1694.83
2	56.83	53.33	56.58	58.32	58.32	40.35	43.10	40.85	29.62	30.37	44.85	51.83	
3	57.08	53.58	56.58	58.32	58.07	40.60	42.85	40.85	29.62	30.12	44.60	51.58	
												1694.83	
FT	170.48	160.49	169.98	175.47	174.72	121.56	128.80	123.06	89.12	91.12	134.54	155.50	Promedio
Promedio	56.83	53.50	56.66	58.49	58.24	40.52	42.93	41.02	29.71	30.37	44.85	51.83	47.08
F	676.42				548.14				470.28				
T	434.31			373.17			433.32			454.03			

Prueba Duncan para efectos principales del factor dosis Fenton (F) y tiempo (T)

Prueba Duncan	T1	T2	T3	T4	Promedio F
F1	56.83	53.50	56.66	58.49	56.37
F2	58.24	40.52	42.93	41.02	45.68
F3	29.71	30.37	44.85	51.83	39.19
Promedio T	48.26	41.46	48.15	50.45	

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

F	Medias
F1	56.37
F2	45.68
F3	39.19
Sx: 0.06	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor Dosis Fenton (F)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
F1-F2	10.69	2	2.92	0.18	*
F1-F3	17.18	3	3.07	0.19	*
F2-F3	6.49	2	2.92	0.18	*

Prueba Duncan (0.05) para efectos principales del factor tiempo (T)

T	Medias
T4	50.45
T1	48.26
T3	48.15
T2	41.46
Sx : 0.07	

Prueba de comparación de medias Duncan para efectos principales del factor tiempo (T)

VS	Diferencia	P	AES	ALS(D)	Sig
T4-T1	2.19	2	2.92	0.21	*
T4-T3	2.30	3	3.07	0.22	*
T4-T2	8.98	4	3.16	0.22	*
T1-T3	0.11	2	2.92	0.21	NS
T1-T2	6.79	3	3.07	0.22	*
T3-T2	6.68	2	2.92	0.21	*

**PANEL FIGURAS**



*Figura 17: Muestreo del efluente del camal municipal Regulo Bernal Torres*



*Figura 18: Muestreo*



Figura 19: *Llenado del recipiente con la muestra*



Figura 20: *Recipiente conteniendo el efluente*



Figura 21: *Fotómetro marca HANNA modelo HI 83225, empleado para la caracterización de la muestra del efluente*



Figura 22: *Caracterización de la muestra Equipo para la medición del pH, multiparámetro marca HANNA, modelo HI 2550.*



Figura 23: *Reactivos empleados para la dosificación*

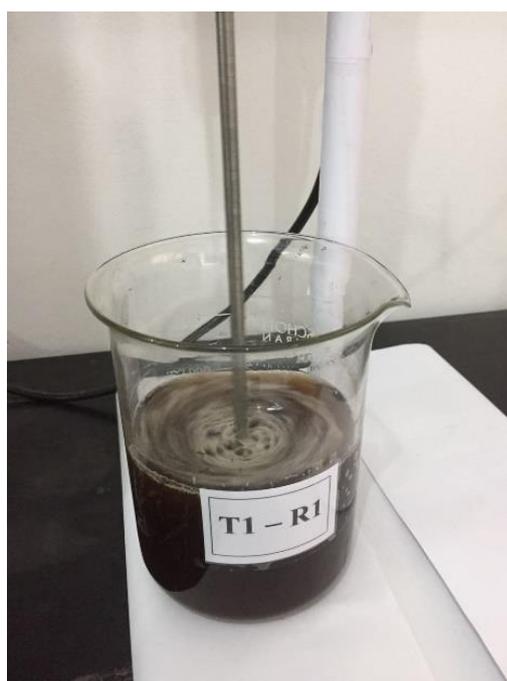


Figura 24: *Homogenización de la muestra*



Figura 25: Unidades de muestra de los tres tratamientos para la repetición uno



Figura 26: Unidades de muestra del tratamiento 2 para las tres repeticiones

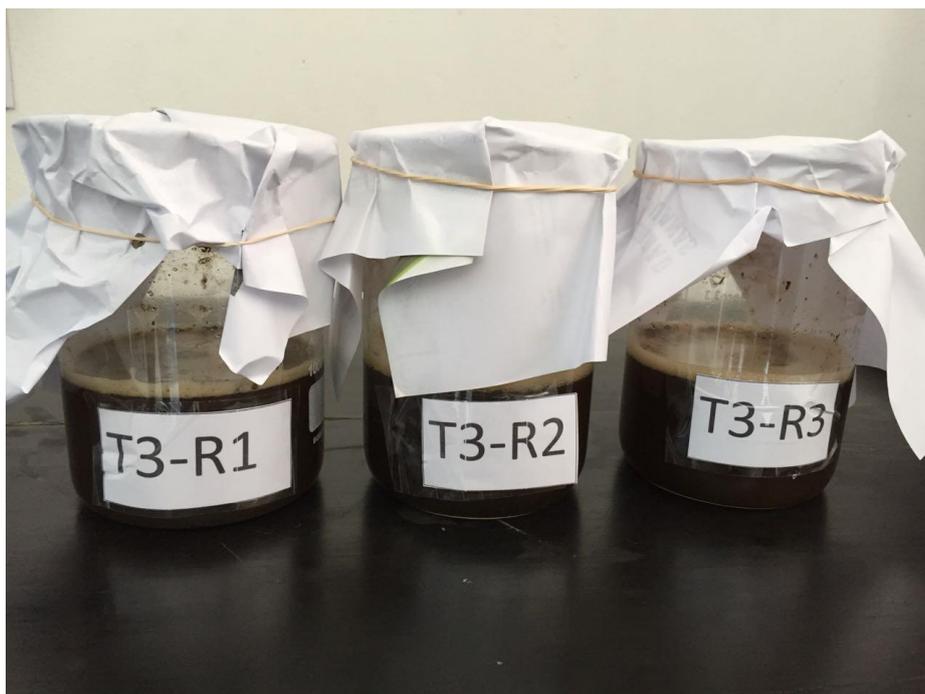


Figura 27: Unidades de muestra del tratamiento 3 y sus tres repeticiones



Figura 28: Reactivos empleados en la determinación de la demanda química de oxígeno

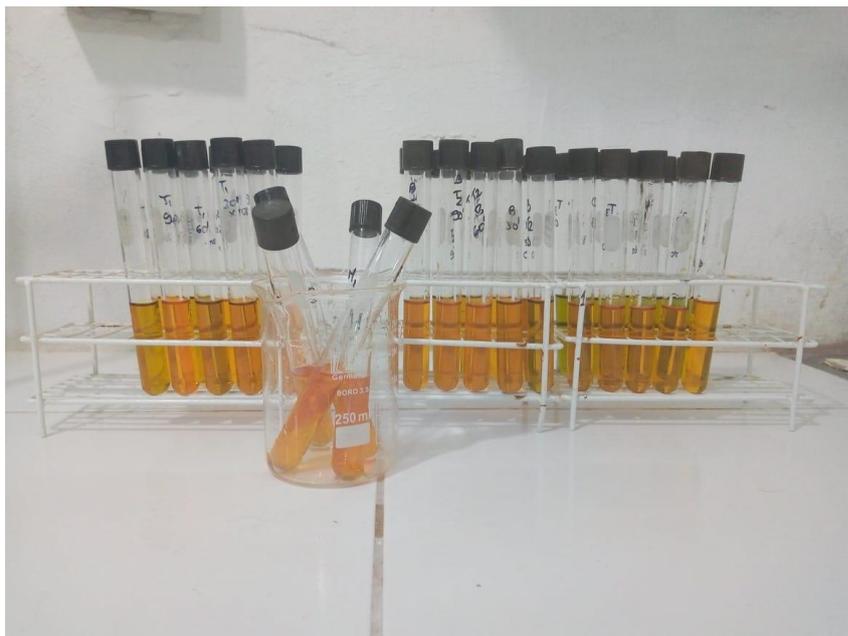


Figura 29: Muestras sometidas a reflujó



Figura 30: Valoración de la muestra y el blanco con sal de Mhor.

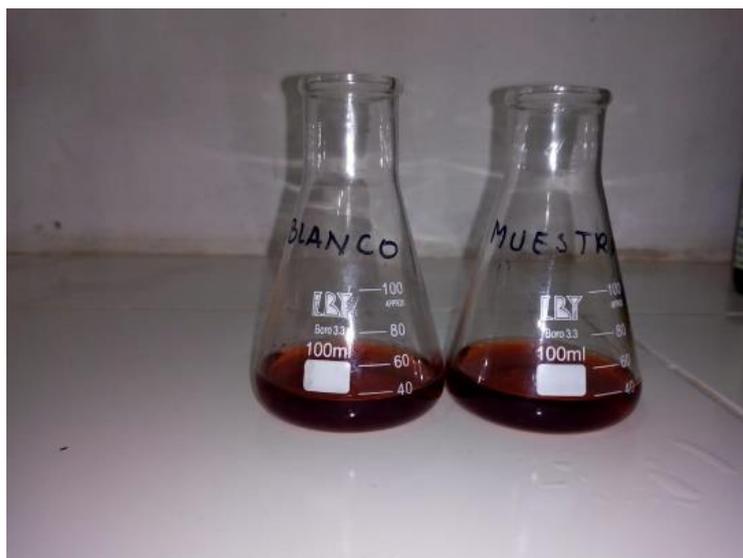


Figura 31: *Muestras valoradas*



Figura 32: *Tesista preparando la muestra en el laboratorio*



Figura 33: *Tesista trabajando en el termo reactor*



Figura 34: *Muestra sin tratamiento y con tratamiento del reactivo de Fenton*