



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**

ESCUELA DE POSGRADO



DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**“Sistema electro-Fenton para tratar aguas residuales
del camal municipal de Chota – Cajamarca”**

TESIS

**Presentada para obtener el grado académico de
Doctor en Ciencias Ambientales**

AUTOR:

M.sc. Carlos Javier Medina Valderrama

ASESOR:

Dr. Sebastián Huangal Schenieder

Lambayeque

2022

**Sistema electro-Fenton para tratar aguas residuales del camal municipal de Chota –
Cajamarca**



**M.sc. Carlos Javier Medina Valderrama
AUTOR**



**Dr. Sebastián Huangal Scheineder
ASESOR**

Presentada a la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para
optar el grado académico de **DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

APROBADA POR:



**Dra. Carmen Rosa Carreño Farfán
Presidenta**




**Dr. Segundo Juan López Cubas
Secretario**



**Dr. Daniel Carranza Montenegro
Vocal**

Lambayeque, 2022

| | | | |
|--|--|---------------------|-----------|
|  UNPRG <small>UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO</small> | ESCUELA DE POSGRADO <i>M.Sc. Francis Villena Rodríguez</i> | Versión: | 01 |
| | | Fecha de Aprobación | 29-8-2020 |
| UNIDAD DE INVESTIGACIÓN | <u>FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS</u> | Pág. 1 de 3 | |

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS

Siendo las 4.00 p.m. del miércoles 16 de marzo de 2022, se dio inicio a la Sustentación Virtual de Tesis soportado por el sistema Google Meet, preparado y controlado por la Unidad de Tele Educación de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, con la participación en la Video Conferencia de los miembros del Jurado, nombrados con Resolución N°034-2022, de fecha 11 de enero de 2022, conformado por:

| | |
|---|------------|
| Dra. <u>CARMEN ROSA CARREÑO FARFÁN</u> | Presidenta |
| Dr. <u>SEGUNDO JUAN LÓPEZ CUBAS</u> | Secretario |
| Dr. <u>DANIEL CARRANZA MONTENEGRO</u> | Vocal |
| Dr. <u>SEBASTIAN HUANGAL SCHEINEDER</u> | Asesor |


Para evaluar el informe de tesis del tesista CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA, candidato a optar el grado de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES con la tesis titulada "SISTEMA ELECTRO-FENTON PARA TRATAR AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA - CAJAMARCA".

La Sra. Presidenta, después de transmitir el saludo a todos los participantes en la Video Conferencia de la Sustentación Virtual ordenó la lectura de la Resolución N°218- 2022-EPG de fecha 3 de marzo de 2022 que autoriza la Sustentación Virtual del Informe de tesis correspondiente, luego de lo cual autorizó al candidato a efectuar la Sustentación Virtual, otorgándole 50 minutos de tiempo y autorizando también compartir su pantalla.

Culminada la exposición del candidato, se procedió a la intervención de los miembros del Jurado, exponiendo sus opiniones y observaciones correspondientes, posteriormente se realizaron las preguntas al candidato.

Culminadas las preguntas y respuestas, la Sra. Presidenta, autorizó el pase de los miembros del Jurado a la sala de video conferencia reservada para el debate sobre la Sustentación Virtual del Informe de tesis realizada por el candidato, evaluando en base a la rúbrica de sustentación y determinando el resultado total de la tesis con _18_ puntos, equivalente a _Muy Bueno_, quedando el candidato apto para optar el Grado de DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES.

| | | |
|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Formato : Físico/Digital | Ubicación : UH-EPG - UNPRG | Actualización: |
|--------------------------|----------------------------|----------------|

| | | | |
|---|---|---------------------|-----------|
|  | ESCUELA DE POSGRADO <i>M.Sc. Francis Villan Rodríguez</i> | Versión: | 01 |
| | | Fecha de Aprobación | 29-8-2020 |
| UNIDAD DE INVESTIGACIÓN | <u>FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL</u> <u>DE TESIS</u> | Pág. 2 de 3 | |

Se retomó a la Video Conferencia de Sustentación Virtual, se dio a conocer el resultado, dando lectura del acta y se culminó con los actos finales en la Video Conferencia de Sustentación Virtual.

Siendo las 5.00 p.m. se dio por concluido el acto de Sustentación Virtual.



PRESIDENTE



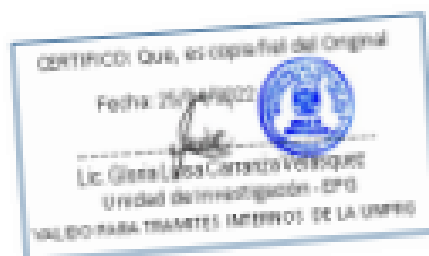
SECRETARIO



VOCAL



ASESOR



| | | |
|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Formato : Físico/Digital | Ubicación : UH-EPG - UNPRG | Actualización: |
|--------------------------|----------------------------|----------------|

Declaración jurada de originalidad

Yo, M.Sc. Carlos Javier Medina Valderrama, investigador principal, y Dr. Sebastián Huangal Scheineder, asesor del trabajo de investigación “Sistema electro-Fenton para tratar aguas residuales del camal municipal de Chota - Cajamarca”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demostrara lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiere lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 14 de julio del 2022.



M.Sc. Carlos Javier Medina Valderrama
Autor



Dr. Sebastián Huangal Scheineder
Asesor

DEDICATORIA

Para mis pedacitos de cielo, risas y llantos cuando el sol se alista a brillar en un nuevo día, abrazos y besos cuando el cansancio y sueño enmudece sus labios... razón de mi esfuerzo y superación; mis hijos Alvaro y Lyana.

A la memoria de mis padres Segundo y Petronila, y a la de mi hermana Betty, tengo la certeza que en la dimensión en que se encuentren ya están construyendo otro castillo de amor para sus hijos.

Para Alina mi esposa, la compañera ideal, la amiga perfecta, la cómplice que está allí cuando más se le necesita, hoy te vestirás de alegría porque este logro también es tuyo.

CARLOS JAVIER

AGRADECIMIENTO

- A mi asesor el Dr. Sebastián Huangal Scheineder por su apoyo incondicional para lograr culminar la tesis, gracias por su tiempo y predisposición.
- Al Ing° Wilmer Uriarte por el invalorable apoyo en los muestreos y análisis fisicoquímicos, sin su ayuda era un proceso de nunca acabar. A pesar de la brecha de edad que nos separa se logró cultivar una amistad sólida que continúa perdurando en el tiempo, como hace el verdadero amigo, no dudaste en brindarme ese apoyo moral y psicológico en momentos cruciales para asimilar las pruebas de la vida.
- A mi gran amigo Ing° Edgar Michel Montero del Águila, a pesar que la muerte te sorprendió en la cúspide de la vida, más que tu ayuda profesional en este trabajo, agradezco haber compartido momentos de alegría y tristezas en ese espacio que nos brindó el Ing° Uriarte, donde siempre nos decías.... Pásame los datos.... como no me voy a recordar de ti el resto de vida que me queda si fuiste una persona leal y consecuente de tus actos, digno de llamarte amigo.
- Al Blgo. Salvador Thomas Orrego Zapo, siempre dispuesto y con la alegría que lo caracteriza para recibir las muestras y realizar los procesos de análisis microbiológicos, gracias por tu tiempo y disponibilidad, y porque nunca recibí de ti un No como respuesta.
- A mis hermanos por su apoyo moral, y por estar siempre unidos a pesar de nuestras diferencias, ello ha sido un ingrediente esencial en este trabajo que demandó mucho esfuerzo, gracias por todo.
- Y a todas aquellas personas que aportaron con sus comentarios, observaciones y críticas constructivas que permitió este trabajo se culmine.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| DEDICATORIA | 6 |
| AGRADECIMIENTO | 7 |
| RESUMEN | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 12 |
| CAPÍTULO I..... | 19 |
| 1.1.- AGUAS RESIDUALES DE CAMALES..... | 19 |
| 1.1.1.- <i>Ubicación</i> | 19 |
| 1.1.2.- <i>Problemática de las aguas residuales</i> | 19 |
| 1.1.3.- <i>Características de las aguas residuales</i> | 22 |
| 1.1.4.- <i>Metodología</i> | 26 |
| CAPITULO II | 33 |
| MARCO TEORICO..... | 33 |
| 2.1.- ANTECEDENTES | 33 |
| 2.2.- BASES TEÓRICAS | 45 |
| 2.2.2.- <i>Reactivo de Fenton</i> | 47 |
| 2.2.3.- <i>PROCESO ELECTRO-FENTON</i> | 50 |
| 2.2.4.- <i>Parámetros críticos en el sistema electro-Fenton</i> | 52 |
| 2.2.5.- <i>Categorías de los sistemas electro-Fenton</i> | 54 |
| • Proceso electro-Fenton..... | 54 |
| • Electro-Fenton - Fere | 55 |
| • Peroxidación electroquímica | 55 |
| CAPITULO III | 57 |
| RESULTADOS DE LA INVESTIGACION | 57 |
| 3.1.- Análisis e interpretación de los datos..... | 58 |
| 3.1.1.- <i>Tiempo de reacción óptimo del proceso electro-Fenton sobre aguas residuales del camal de Chota.</i> | 58 |
| 3.1.2.- <i>Remoción porcentual de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota.</i> | 60 |
| 3.1.3.- <i>Optimización de la aplicación del proceso electro-Fenton-Fere en aguas residuales del camal municipal de Chota</i> | 70 |
| 3.1.4.- <i>Análisis de conveniencia mediante la optimización de respuesta múltiple</i> | 71 |
| 3.1.5.- Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota. | 75 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.6.- <i>Cinética de remoción de DQO en aguas residuales a condiciones óptimas del proceso Electro-Fenton-Fere.</i> | 78 |
| 3.1.7.- <i>Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales del camal municipal de Chota después de la optimización del proceso electro- Fenton-Fere.</i> | 84 |
| 3.1.8.- PRUEBA DE HIPÓTESIS..... | 86 |
| 3.1.9.- <i>Prueba de rangos múltiples para las aguas residuales del camal municipal de Chota.</i> | 88 |
| 3.2.- PROPUESTA TEÓRICA | 94 |
| CONCLUSIONES | 98 |
| RECOMENDACIONES..... | 99 |
| REFERENCIAS | 100 |
| ANEXOS | 106 |

RESUMEN

La tesis evaluó la mejora de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota que contienen grandes cantidades de sangre, materia fecal, grasas, proteínas, aminos, material lignocelulósico, vísceras, pelos y pezuñas de los animales faenados y que son directamente descargadas a las aguas de la quebrada Colpamayo, representando un peligro latente de contaminación al ecosistema. El sistema de tratamiento estudiado se basó en el proceso electro-Fenton-Fere, se usaron electrodos de grafito y acero inoxidable con un área efectiva de $22,5 \text{ cm}^2$ con una intensidad de corriente de $8,7 \text{ A/m}^2$ en un sistema de celda electroquímica de 1 L con agitación a 30 rpm. Se efectuaron pruebas de oxidación en medio ácido, se utilizó el diseño experimental de baja composición de Draper-Lin y los resultados se evaluaron con la metodología de superficie de respuesta y prueba de hipótesis mediante comparación de rangos múltiples con el software Statgraphics 5.1 Plus, además mediante pruebas analíticas e instrumentales se calculó la alcalinidad, dureza, pH, temperatura, conductividad, resistividad, sólidos totales, turbidez, ORP y OD. Se verificó que el tiempo óptimo de contacto fue 25 minutos, concentración óptima de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno de 1098,03 mg/L y 828,41 mg/L a pH 3,07 y voltaje de 25,8 V, siguiendo una cinética de degradación de pseudo-primer orden, observándose una mejora del IB de 0,394 a 0,509. Se concluyó que las aguas del camal municipal de Chota mejoraron notablemente en sus parámetros estudiados mediante la aplicación del sistema de proceso electro-Fenton logrando una remoción de DQO alrededor del 89,43 %.

Palabras clave: proceso electro-Fenton-Fere, aguas residuales, biodegradabilidad.

ABSTRACT

The thesis evaluated the improvement of wastewater generated in the municipal slaughterhouse of Chota, which contain high amounts of blood, fecal matter, fats, proteins, amines, lignocellulosic material, viscera, hairs and hooves of slaughtered animals and that are directly discharged to the waters of the Colpamayo streams representing a latent danger of contamination to the ecosystem. The treatment system studied was based on the electro-Fenton-Fere process, graphite and stainless steel electrodes with an effective area of 22,5 cm² with a current intensity of 8,7 A / m² were used in a 1 L electrochemical cell system with agitation at 30 rpm. Oxidation tests were carried out in acidic medium, the experimental design of low composition of Draper-Lin was used and the results were evaluated with the response surface methodology and hypothesis test by comparing multiple ranges with the Statgraphics 5.1 Plus software, in addition to analytical and instrumental tests, alkalinity, hardness, pH, temperature, conductivity, resistivity, total solids, turbidity, ORP and OD were calculated. It was verified that the optimal contact time was 25 minutes, optimal concentration of ferrous sulfate and hydrogen peroxide of 1098,03 mg/L and 828,41 mg/L at pH 3,07 and voltage of 25,8 V following a pseudo first-order degradation kinetics, observing a IB improvement from 0,394 to 0,509. It concluded that the wastewater of municipal slaughterhouse of Chota improved markedly in their parameters studied by applying the electro-Fenton process system, achieving a COD removal around 89,43 %.

Keywords: electro-Fenton-Fere process, wastewater, biodegradability.

INTRODUCCIÓN

La mayor fuente de contaminación de cuerpos de aguas superficiales y subterráneas es ocasionada principalmente por el vertido deliberado de millones de litros de aguas residuales producto de las diferentes actividades domésticas, urbanas e industriales que incrementan el riesgo de salubridad humana y del ecosistema, así; éstas varían en su complejidad de un lugar a otro y depende del grado de desarrollo de cada país, pero casi el ochenta por ciento de estas aguas residuales no tienen un tratamiento oportuno para evitar la contaminación y proliferación de enfermedades, lo que supone un daño grave a la biodiversidad ya que se estima que las poblaciones urbanas en el mundo se duplicarán en las próximas cuatro décadas y muchas de ellas se encuentran en zonas costeras donde el vertimiento de sus líquidos residuales serán aún más peligrosas (Larios - Meoño et al., 2015).

Latinoamérica no está exento de la problemática, puesto que un considerable porcentaje de aguas residuales se devuelven a los ríos sin recibir ningún tratamiento, esto acarrea serias implicaciones ecológicas ya que la región alberga unas de las biodiversidades más imponentes del planeta, concentrándose alrededor de la tercera parte de las fuentes de agua, por tanto; los niveles de contaminación también se atentan en dicha magnitud, es por ello que el ser humano está en permanente búsqueda de novedosos métodos de tratamiento (Gilpavas et al., 2018) que ayuden a superar las limitaciones de los existentes, sean factibles económicamente y de fácil manejo a fin de minimizar los riesgos de dicha aguas contaminadas en su manipulación posterior.

En el Perú, es la Constitución Política el primer documento oficial que reconoce los derechos ambientales para las personas, en el artículo 2, inciso 22, del capítulo I, menciona textualmente: "Toda persona tiene derecho a la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de la vida", sin embargo; la generación de aguas residuales en nuestro país en especial las de

tipo industrial en su mayoría no son tratadas (Cusiche y Miranda, 2019) y se vierten sin ningún control a pesar de que existe una legislación cada vez más dura (Tabla 1), con organismos gubernamentales encargados de vigilar, monitorear, sancionar y gestionar los parámetros de calidad sobre cuerpos receptores, pero lo establecido no se ve reflejado en los ecosistemas.

La provincia de Chota cuenta con un camal municipal cuya ubicación actual está dentro del casco urbano y es administrada por la Municipalidad de la provincia, tal establecimiento viene funcionando hace más de 45 años, cuando ésta se ubicaba a las afuera de la ciudad, pero el acelerado crecimiento de la población y el asentamiento de las familias en la zona costera de la quebrada Colpamayo ha propiciado que dicho camal se transforme en un riesgo latente de infecciones ya que no trata sus aguas residuales (Medina et al., 2020) y las vierte deliberadamente sobre las aguas de la quebrada mencionada lo que agudiza la problemática a niveles inesperados.

En dicho establecimiento se estabulan y sacrifican animales vacunos, ovinos, caprinos y porcinos para beneficio de carnes, durante la estabulación se generan residuos fecales y orina, ya en el área de sacrificio se limpian con agua para retirarle del cuerpo, suciedad y restos de excremento. Luego del sacrificio, la sangre, materia fecal, vísceras, pelos, grasas, proteínas, material lignocelulósico, sólidos en suspensión y disueltos, sustancias provenientes de la mucosa y limpieza de equipos, generan considerables volúmenes de aguas residuales con altos valores en la DQO, DBO₅, turbidez, sólidos totales, alcalinidad, dureza, valores negativos de los procesos oxido-reducción (ORP) y bajo nivel del oxígeno disuelto (OD).

Bajo las premisas expuestas varios organismos estatales tienen competencia para vigilar, sancionar y gestionar los vertimientos sobre cuerpos de agua (Aquino, 2017), es así que la Dirección Ejecutiva de Salud (DESA) — Chota, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), La Entidad de Fiscalización Ambiental (EFA) y la propia municipalidad provincial de Chota

como institución administradora del camal tienen competencia de acuerdo a sus facultades para atender dicha problemática, pero lamentablemente no se ha dado la respectiva atención a lo que probablemente constituya un foco alarmante de contaminación en especial para las personas que puedan hacer uso de dichas aguas de la quebrada Colpamayo.

Tabla 1

Resumen de Legislación Ambiental Nacional respecto a las aguas residuales en el Perú

| | |
|--|--|
| Constitución Política del Perú de 1993 | 31/10/1993 |
| Ley general de salud | Ley N° 26842 |
| Ley general del ambiente | Ley N°28611 |
| Ley de creación, organización y funciones del MINAM. | D.L. N°1013 |
| Ley orgánica de municipalidades | Ley N° 27972 |
| Ley de recursos hídricos | Ley N° 29338 |
| Ley del sistema nacional de Evaluación de impacto ambiental. | Ley N° 27446 |
| Resolución Jefatural N°0291 - 2009 – ANA | Autorización de vertimientos y reuso de aguas residuales tratadas |
| Resolución Jefatural N°0351-2009 – ANA | Modifica R. J. N°0291 – 2009 – ANA |
| D.S. 010 – 2019 – vivienda | Valores máximos permisibles de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado. |
| D.S. N° 0002 – 2008 – MINAM | Aprueban Estándar de Calidad del Agua. |
| D.S. N° 0003 – 2010 – MINAM | Límites máximos permisibles para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y Municipales. |
| Norma procesal penal ambiental | Ley N° 26631 |

Nota. Recuperado del compendio de Legislación Ambiental del Perú —MINAM.

Cabe resaltar que el camal municipal de Chota no dispone de una tecnología adecuada para tratar sus aguas residuales y las vierte tal cual como las genera, lo que está provocando una contaminación seria en el punto de descarga y a lo largo del recorrido de las aguas de la quebrada Colpamayo, atrayendo consigo vectores de infección que promueven la proliferación de un sinnúmero de microorganismos patógenos causantes de enfermedades entéricas, mal olor y color debida a la degradación parcial de la materia orgánica que generan

sustancias volátiles y eutrofización paulatina de las riveras de la quebrada hacia su confluencia al río Chotano (Habla Cajamarca la Beta Radio, 2019).

Las tecnologías avanzadas de oxidación fundamentadas en sistemas electroquímicos de oxidación indirecta como el proceso electro-Fenton se perfila como una técnica prometedora (Alizadeh y Barkdoll, 2017) para mejorar la calidad de las aguas residuales de camales, tiene grandes beneficios ambientales, no requiere grande espacios, ofrece compatibilidad y versatilidad, tiempos cortos de tratamiento, seguridad, utiliza equipo convencional y es de fácil automatización, no genera olores desagradables, costos accesibles, cuya aplicación controlada produce cambios estructurales en las sustancias orgánicas contaminantes mediante la generación in situ de radicales hidroxilos (OH^*).

Los radicales OH^* es una especie química transitoria que se genera al hacer reaccionar sales ferrosas con peróxido de hidrógeno en medio ácido, sin embargo; para reducir la cantidad de adición de sales se tiene la alternativa de llevar a cabo la reacción de degradación dentro de un reactor electroquímico para propiciar la reducción de los iones Fe^{+3} , donde los radicales OH^* generados poseen un potencial de oxidación tan alto que pueden oxidar parcial o totalmente los contaminantes de manera no específica y con altas velocidades de reacción facilitando un eventual proceso biológico posterior o su descarga en cuerpos receptores sin ningún post- tratamiento (Arivazhagan y Tubakara, 2015).

A la luz de la tecnología mencionada y la urgencia de plasmar sistemas alternativos de tratamiento que brinden soluciones eficaces para mejorar la calidad de las aguas residuales con una inversión económica accesible (Sathya et al., 2019), y que la municipalidad provincial de Chota pueda hacer uso de ésta, el presente trabajo de investigación plantea el problema: ¿Cómo influye la aplicación de un sistema electro-Fenton para tratar las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota-Cajamarca?, sabiendo que dichas aguas poseen un alto grado de complejidad contaminante aunado al poco espacio físico

disponible con que cuenta el camal, el sistema propuesto se adecua a las necesidades.

En tal sentido; para lograr dar una alternativa de solución al problema planteado la investigación propone como objetivo principal: Evaluar la influencia del sistema electro-Fenton -Fere para tratar aguas residuales del camal municipal de Chota - Cajamarca; donde fue indispensable conocer las características fisicoquímicas iniciales de las aguas residuales y clasificar el tipo de agua residual a tratar mediante el cálculo del índice de biodegradabilidad (IB), luego; se encontró la dosis óptima de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno a pH y voltaje óptimos, y la cinética con que dichas aguas se degradan.

El estudio contempla la ejecución de análisis físico-químico y biológico de las aguas del camal a nivel de laboratorio, donde la probabilidad de obtener una agua residual tratada con características fisicoquímicas y biológicas aceptables mediante el sistema electro- Fenton - Fere se perfila como un método atractivo, por tanto la investigación plantea la hipótesis: La adecuada dosificación de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno, pH y voltaje en un sistema electro-Fenton - Fere mejora de manera significativa el tratamiento de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota - Cajamarca.

Para probar la hipótesis, las muestras fueron tomadas al azar mediante trabajo de campo en el punto de descarga del camal, se realizaron pruebas cinéticas de degradación y los datos obtenidos mediante análisis físico-químicos e instrumental se almacenaron en una plantilla Excel para luego ser exportados al software Statgraphics 5.1 plus donde se analizaron siguiendo el diseño de experimentos de baja composición de Draper-Lin mediante la metodología de superficie de respuesta y prueba de hipótesis mediante comparación de rangos múltiples, optimizándose las 4 variables independientes establecidas, los que posteriormente se ensayaron en una muestra final verificándose la máxima remoción de la DQO como variable respuesta.

Los aportes teóricos de la investigación radican en que los sistemas electro - Fenton

aplicados al tratamiento de aguas residuales no pueden restringirse a un mecanismo de interpretación clásica que sugiere la vía radical, ya que es criticable porque el mecanismo solo propone el radical libre OH^* (Aydiner et al., 2019) como única especie dentro de una serie de reacciones de iniciación, ciclos y terminación, donde probablemente se generen otras especies químicas, así también; solamente se reconoce sal Fe^{+2} y Fe^{+3} como las formas únicas del hierro en el sistema.

No se discute que el radical OH^* es uno de los principales responsables de la efectividad de la reacción de degradación de contaminantes a valores de pH bajos, sin embargo; se puede postular el mecanismo no radical para la reacción puesto que existen una serie de reacciones intermedias primarias, formación de complejos secundarios y especies binucleares (Gutiérrez, 2020) que hacen suponer que la concentración de ion ferroso no está en un estado invariable sino más bien que tienden a cero conforme avanza la reacción de oxidación pero estos son regenerados en el cátodo del sistema electroquímico.

Los aportes metodológicos de la investigación sustentan que para la aplicación del sistema electro-Fenton en el tratamiento de aguas residuales de camales es necesario practicar una previa filtración para eliminar el material lignocelulósico, asimismo; la adecuada selección de los electrodos basada en factibilidad técnica contribuye a la viabilidad del proceso. Por otro lado, se verificó que la optimización de los reactivos de Fenton reducen el nivel de lodos (He y Zhou, 2017) debido al manejo óptimo de pH y voltaje, donde el Fe^{+3} es constantemente reducido a Fe^{+2} , por lo que mantener una relación de equilibrio es vital para minimizar la aparición de reacciones competitivas en los electrodos de la celda electroquímica.

Las tecnologías convencionales de tratamiento para aguas residuales tienen fuertes limitaciones que van desde el espacio físico requerido, complejidad, hasta la efectividad del proceso, en la actualidad se vienen desarrollando y aplicando en otros ámbitos las tecnologías avanzadas de oxidación electroquímica a pequeña y mediana escala con gran satisfacción

(Popat et al., 2019), si bien es cierto las tecnologías basadas en el reactivo de Fenton están poco difundidas en nuestro medio, el estudio revela que resulta beneficiosa para mejorar la características de las aguas residuales de camales y que la municipalidad provincial de Chota puede tomar como alternativa para minimizar los riesgos de contaminación ambiental ya que no se requiere de grandes y costosos equipos complejos y su efectividad está comprobada.

La importancia de la investigación se sustenta en que la aplicación del sistema electro-Fenton resuelve eventualmente la problemática de las aguas residuales del camal mejorando los impactos negativos que padecen día a día muchas familias que habitan en el entorno cercano al camal y que están expuestas diariamente a contaminación biológica latente y que la municipalidad provincial de Chota debería tener en consideración, ya que las tecnologías convencionales tienen algunas limitaciones comparada con los sistemas electro-Fenton que ofrecen eficacia, seguridad, velocidad, facilidad de manejo, mínimo espacio físico, equipo convencional y bajos costos de tratamiento.

Por tanto, para una mejor comprensión la tesis contempla la estructura siguiente:

- El capítulo I enmarca el análisis de las aguas residuales del camal municipal del Chota, ubicación, problemática, surgimiento del problema, características y metodología empleada.
- El capítulo II muestra el marco teórico de la investigación.
- El capítulo III expresa los resultados con sus respectivas interpretaciones y la propuesta teórica.

Para finalizar se presentan las conclusiones, recomendaciones y referencias.

CAPÍTULO I

1.1.- AGUAS RESIDUALES DE CAMALES

1.1.1.- *Ubicación*

En la actualidad el camal municipal de Chota está bajo la administración de la municipalidad provincial de Chota y se sitúa geográficamente dentro del casco urbano de la ciudad de Chota en el departamento de Cajamarca, en las coordenadas W: 78°38,705', S: 6°33,836', específicamente en la prolongación de la avenida Bambamarca colindando por el lado izquierdo con el cauce de la quebrada Colpamayo hacia la confluencia con el río Chotano.

La tesis se enmarca dentro de una investigación aplicada y tiene como característica principal la minuciosidad en que analiza la realidad donde se desenvuelve el ser humano, utilizando los conocimientos básicos adquiridos para generar otros, donde dichas investigaciones están orientadas a brindar propuestas para atender necesidades de la vida diaria, así como también vigilar situaciones prácticas explotando teorías científicas previamente validadas, mejorando estrategias y actuaciones concretas en favor de la sociedad (Lozada, 2014).

Desde el punto de vista ontológico la investigación tiene una postura reflexiva, donde la realidad en esencia es considerada existente e imperfectamente comprendida ya que los fenómenos que se suscitan no pueden controlarse y el ser humano no es considerado perfecto, así la interrogante epistemológica puede ser abordada mediante un dualismo modificado y objetivismo donde los hallazgos encontrados son considerados probablemente verdaderos (Ramos, 2015).

1.1.2.- *Problemática de las aguas residuales*

El agua es el elemento esencial para garantizar el sostenimiento y continuidad

de la vida en la tierra, una vez que ésta es usada por alguna actividad antropogénica pasa a ser una agua residual que debe ser dispuesta tan igual o en mejores condiciones de la que fue tomada, sin embargo; resulta preocupante como son vertidas, ya que existen evidencias de los impactos negativos que producen (Chávez-Vera, 2017), pero esta problemática no es un tema de ahora, ello ya era visible hace dos siglos atrás, exactamente con la revolución industrial europea la que estuvo asociada con la gran explosión urbana del siglo XIX causada por un fenómeno migratorio de poblaciones rurales a la zona urbana.

Tales migraciones eran motivadas por las oportunidades de empleos que se ofertaban en las emergentes fábricas en busca de bienestar y mejores condiciones económicas (Carrillo, 2017), desencadenando un crecimiento exponencial desproporcionado que en el corto tiempo se convirtieron en poblaciones obreras asentadas en ciudades no planificadas, trayendo consigo sus costumbres y estilos de vida, las que dieron origen a la aparición de enfermedades entéricas como el cólera, tifoidea, malaria, etc, ya que las condiciones básicas de saneamiento eran insuficientes e inadecuadas y el desarrollo de tratamientos de purificación aun eran incipientes.

Ya a inicios del siglo XX se propiciaron las primeras instituciones para la protección ambiental a fin de emitir leyes y normativas para controlar los impactos que provocan la disposición de aguas residuales no tratadas, siendo el primer paso hacia una evolución de procesos industriales más amigables con el ambiente, sin embargo; las características de las aguas residuales dependen del lugar donde son generados y del grado de desarrollo tecnológico del que se disponga (Marchdar et al., 2018), y en función a ello se establecen las normativas, así en Latinoamérica aún se observa en ciertas regiones inadecuada disposición de

vertidos líquidos contaminados y ausencia de tratamientos oportunos las que probablemente estén impactando sobre aguas superficiales, napa freática y suelos (Nguyen et al., 2018)

Las fuentes de mayor impacto en la generación de aguas residuales son la industria petrolera, minera, metalúrgica, curtiembre, seguida por la industria farmacéutica, alimentaria y toda aquella que implique transformación de la materia, a pequeña, mediana o gran escala (Montes - Valencia, 2015), sin embargo; el problema radica en que países generalmente en proceso de desarrollo a pesar de contar con entes gubernamentales fiscalizadores y sancionadores, las instituciones públicas y privadas no han internalizado ni han asumido el compromiso de respetar las normativas impuestas y las vulneran con facilidad incluso pagando fuertes sanciones económicas.

En función a su composición las aguas residuales pueden producir malos olores e infecciones y ser altamente peligrosa capaz de atentar la vida de seres acuáticos y terrestres y la del ser humano, por ello las instituciones pertinentes deben supervisar el cumplimiento de las disposiciones gubernamentales dadas a fin de prevenir o minimizar los impactos negativos y al mismo tiempo promover la implantación de métodos de tratamiento y purificación. En tanto; la problemática de las aguas residuales motiva a indagar tratamientos novedosos y eficaces que mejoren lo existente y que sean factibles económicamente y de fácil manipulación. (Chuptaya y Huamán, 2020)

La disponibilidad del agua se ha visto seriamente comprometida en nuestro planeta a pesar de poseer tres cuartas partes del recurso hídrico, en algunas regiones del mundo la demanda supera a la oferta y en otras están muy contaminadas o no reúnen las características fisicoquímicas y biológicas mínimas

para su uso (Villena, 2018), es por ello que los gobiernos de la región hacen denodados esfuerzos para atender la problemática de las aguas residuales a través de normativas, organismos gubernamentales fiscalizadores cuyo fin es restringir la descarga de fluidos contaminantes a cuerpos de aguas no solo a nivel empresarial sino también a nivel de municipalidades.

En el Perú, se vierten en forma sistemática y deliberada alrededor de un 70% de las aguas residuales generadas tanto doméstica como industriales sin ningún control, a diferencia de otros países que ya superaron esta problemática pues observaron en las aguas residuales un recurso aprovechable de reuso para fines de irrigación (Rodríguez et al., 2020) pero nuestro país aún toma a las aguas residuales como un desperdicio, una molestia, un riesgo para la salud pública, dejando una preocupación desconcertante ante las proyecciones de amenaza de escasez en los próximos años (UNESCO, 2020).

La ciudad de Chota no es ajena a la problemática de las aguas residuales y experimenta constantemente la migración de personas del campo a la ciudad quienes se asientan por lo general en las riberas de ríos y cauces trayendo sus costumbres y estilo de vida, obligando al camal municipal a aumentar sus horas de operación, para satisfacer las necesidades de carnes, pero lamentablemente producto de dichas actividades se generan grandes volúmenes de aguas residuales de las diferentes operaciones y no reciben ningún tratamiento siendo vertidas al cauce de la quebrada Colpamayo provocando una seria contaminación de sus aguas y atracción de vectores de infección.

1.1.3.- Características de las aguas residuales

El camal municipal de Chota tiene más de 45 años de antigüedad, a la fecha sigue operando en condiciones obsoletas realizando prácticas de sacrificio de animales vacunos, porcinos y ovinos para beneficio de carne, pero lo que más

preocupa son las aguas residuales que genera, que en efecto son desagradables en su apariencia y en extremo peligrosa en su contenido por la elevada cantidad de patógenos que llevan consigo y la alta carga orgánica debido a la sangre, materia fecal, grasas, proteínas, aminos, material lignocelulósico, vísceras, aguas de lavado, pelos y pezuñas de los animales faenados. (Habla Cajamarca la Beta Radio, 2019)

Figura 1

Vertimiento de aguas residuales del camal municipal de Chota en el cauce de la quebrada Colpamayo



Si bien es cierto hace 25 años atrás, el camal municipal de Chota no se encontraba dentro del casco urbano, y no representaba aparentemente un problema grave para la población ya que no operaba diariamente y la demanda de carnes no era significativa en la ciudad, pero hoy dicha instalación es objeto de atención por sus aguas residuales que genera, un contaminante silencioso y de gran peligrosidad que expone a la población y que debe ser atendida a través de propuestas innovadoras para dar solución acorde a sus posibilidades económicas de la municipalidad de Chota.

Los análisis fisicoquímicos efectuados a las aguas residuales del camal

municipal de Chota revelan valores muy por encima de los máximos admisibles según el D.S. N° 010 — 2019 - Vivienda, así; en la tabla 1 se puede observar que la DQO y DBO_5 tienen altos niveles de requerimiento, cuyo índice de biodegradabilidad (IB) es de 0,394, lo que indica que son aguas que presentan difícil biodegradación, esto es por la gran cantidad de sangre vertida junto con grandes cantidades de materia orgánica contenida en las heces fecales, grasas, material lignocelulósico, insumos de limpieza etc.

Los altos niveles de dureza supone la presencia de gran concentración de calcio y magnesio que la clasifican como una agua residual muy dura, y que debe tenerse en cuenta cuando se pretenda operar a escalas mayores de tratamiento ya que este tipo de agua residual resultaría altamente incrustante para los sistemas de transporte del fluido ya que puede generar placas depositarias insolubles (Pérez-López, 2016) , así también la alcalinidad muestra también un valor muy alto, ello se debe a la presencia de elevadas concentraciones de iones $(\text{HCO}_3)^-$, $(\text{CO}_3)^=$ u (OH) , así como también $(\text{PO}_4)^{-3}$, ácido silícico u otros ácidos con características débiles. Sin embargo, al pH medido de 7.6 la especie de mayor dominancia son los iones bicarbonatos.

El valor de la conductividad indica presencia de materia ionizable, aunque dicho valor tiende a ser moderado indica la abundancia de impurezas en especial sales disueltas, cuya descarga prolongadas sobre cuerpos receptores y uso posterior como en suelos de cultivo puede provocar su inutilización (Guadarrama-Brito y Galván, 2015). Los sólidos totales disueltos evidencian un valor muy por encima de los rangos permitidos por la legislación, y ello se relaciona con los valores de turbidez que ésta posee, la que hace referencia a una agua residual muy turbia con altas concentraciones de material disuelto y en suspensión.

Los valores de OD y ORP, indican un agua residual altamente contaminada por la poca cantidad de oxígeno presente, así como un entorno de óxido - reducción con valores negativos, lo que supone un agua residual altamente reductora lo que se relaciona con la alta demanda química y biológica de oxígeno (Carrasquero-Ferrer, et al., 2014), así también; los ensayos microbiológicos presuntivos indican la presencia de microorganismos patógenos en gran medida (Tabla 3) ello alerta sobre la peligrosidad de las aguas residuales objeto del estudio, siendo éste un foco latente de contaminación ya que las personas hacen uso de éstas aguas para regar sus cultivos, bebidas de animales y probablemente para su propio consumo poniéndose en riesgo la salud.

Tabla 2

Características Fisicoquímicas iniciales de las aguas residuales del camal municipal de Chota

| Parámetro | Medido en | valor |
|------------------------|-----------------------|---------|
| DBO ₅ | ppm O ₂ | 2241.66 |
| DQO | ppm O ₂ | 5682.01 |
| Dureza total | ppm CaCO ₃ | 1440 |
| Dureza cálcica | ppm CaCO ₃ | 480 |
| Dureza magnésica | ppm CaCO ₃ | 960 |
| Alcalinidad total | ppm CaCO ₃ | 1280 |
| Potencial de Hidrogeno | pH | 8.18 |
| Conductividad | μS/cm | 1308 |
| Resistividad | MΩ.cm | 0.0008 |
| Sólidos Totales | Ppm | 8410 |
| Sólidos sedimentables | mL/L | 42 |
| Cloruros | g/L | 1.84 |
| OD | ppm O ₂ | 4.10 |
| Turbidez | FNU | 596 |
| ORP | mV | -86.5 |
| Temperatura | °C | 19.0 |

Tabla 3

Análisis microbiológico presuntivo de microorganismos patógenos en aguas residuales del camal municipal de Chota.

| Tipo de microorganismo | Medio de cultivo | Presunción | ufc (10^{-1} – 10^{-5}) |
|------------------------|----------------------|------------|-------------------------------|
| Crecimiento bacteriano | Agar nutritivo | Positivo | Incontables |
| Enterobacterias | Mac Conkey agar | Positivo | Incontables |
| Salmonella Shigella | SS agar | Positivo | Incontables |
| Vibrio Scholerae | | | |
| Vibrio | TBCS agar | Positivo | Incontables |
| Parahaemolyticus | | | |
| Levaduras | Saboraud Dextrosa | Positivo | Incontables |
| Coliformes | Agar brilla 2% bilis | Positivo | |
| termotolerantes | | | |

1.1.4.- Metodología

La tesis se elaboró con el propósito de buscar una solución eficaz para mejorar los parámetros de calidad de las aguas residuales del camal de Chota, teniendo como base experiencias de tratamientos mediante sistemas electroquímicos de oxidación avanzada (SEOA) indirecta tal como el proceso electro-Fenton-Fere, que en otros escenarios han dado excelentes resultados, para tal efecto se siguió una metodología rigurosa y ordenada que se desarrolló de la siguiente manera:

a.- Recopilación de la información disponible

Se realizó la búsqueda minuciosa y pertinente de información relacionada a las aguas residuales de camales, se efectuaron los primeros análisis preliminares de laboratorio para calcular el índice de biodegradabilidad y de acuerdo a ello plantear la tecnología de tratamiento adecuada. Se estudian los posibles mecanismos de reacción del proceso electro-Fenton - Fere realizándose corridas preliminares para estimar la adición y orden de los reactivos de Fenton así como la cantidad de voltaje, tipo de material y distancia entre electrodos (Davarnejad & Nasiri, 2017).

b.- Medición de parámetros fisicoquímicos iniciales de las aguas residuales del camal de Chota

Tomada la muestra del punto de descarga del camal, se mide la temperatura y pH in situ, luego las muestras son almacenadas en recipientes limpios, secos y rotulados, y se transporta a la brevedad al laboratorio bajo condiciones de oscuridad y baja temperatura reduciendo la actividad biológica y descomposición de materia orgánica, evitando considerables variaciones en los parámetros a medir en los análisis fisicoquímicos y microbiológicos respectivos (Cedeño-Muñoz, 2020). Los análisis practicados son de tipo instrumental, gravimétrico y volumétrico tales como: Análisis de DQO, DBO, turbidez, conductividad, alcalinidad, dureza, pH, temperatura, ORP, OD, sólidos totales, presunción de coliformes totales y *E. coli*.

c.- Tratamiento de las aguas residuales del camal de Chota

La composición fisicoquímica inicial de las aguas residuales permiten seleccionar dentro de los SEOA basadas en el sistema electro-Fenton al proceso electro-Fenton-Fere, esto por la facilidad de manejo, viabilidad, eficacia, seguridad, compatibilidad y bajo costo de tratamiento (Paramo-Vargas et al., 2015), lo que se muestra prometedor ante sustancias de alto poder contaminante, incluso los de naturaleza recalcitrante, cuyo propósito del estudio es optimizar cuatro parámetros del proceso como son: FeSO_4 , H_2O_2 , pH y voltaje.

➤ Tiempo de contacto de la reacción electro-Fenton - Fere

Se toman dos muestras de 1 L de agua residual, se filtran y se adicionan la dosis más alta del reactivo de Fenton a una de ellas y la más baja a la otra a pH = 3 y voltajes de 10 V y 30 V a condiciones ambientales. Se agrega FeSO_4 y se agita a 50 rpm por dos minutos,

luego se baja la velocidad a 30 rpm y se adiciona H_2O_2 , enseguida se pasa energía por los electrodos y cada 5 minutos durante una hora se toman alícuotas de 5 mL, se neutraliza y detiene la reacción con MnO_2 (Zhang et al., 2007), se filtra y de ésta se toman 2 mL que se agregan a los viales de análisis de DQO, después de dos horas de digestión en un termoreactor a 150 °C, se enfrían y se efectúa las lecturas de DQO remanente en un espectrofotómetro UV-VIS previamente calibrado a 620 nm.

➤ **Diseño de experiencias**

Una vez calculado el tiempo de contacto se plantean las corridas experimentales siguiendo el diseño de experimentos de baja composición de Draper — Lin el cual se basa en un diseño factorial reducido o de Plackett — Burman con menor resolución V más unos puntos estrella y puntos centrales (Gaviria-Acosta et al., 2015). Se tomó dicho diseño ya que proporciona resultados significativos con el menor número de experimentos para los 4 factores del estudio de optimización del proceso electro-Fenton: $FeSO_4$, H_2O_2 , pH y voltaje, siendo la variable respuesta la DQO removida.

Se contemplan 18 experimentos por cada corrida experimental donde los primeros ocho experimentos abarcan una media fracción de un factorial de 2^4 , el segundo conjunto de ocho experimentos son los puntos estrella donde α es la distancia axial, y los dos experimentos restantes corresponden a los puntos centrales de la corrida experimental. Se realizaron 2 réplicas y las pruebas se ejecutaron aleatoriamente para disminuir el ruido experimental. Las tablas 4 y 5

muestran las variables, códigos y niveles así como la secuencia de experimentación para la optimización del proceso electro-Fenton - Fere sobre las aguas residuales estudiadas.

Tabla 4

Codificación y niveles empleados para las variables de estudio en el plan experimental

| Variable independiente | Medido en | Simbología | Código de Niveles | | |
|-------------------------------|-----------|------------|-------------------|------|------|
| | | | - | 0 | + |
| FeSO ₄ | mg/L | X1 | 800 | 1100 | 1400 |
| H ₂ O ₂ | mg/L | X2 | 600 | 800 | 1000 |
| pH | 0 – 14 | X3 | 2.5 | 3 | 3.5 |
| Voltaje | V | X4 | 10 | 20 | 30 |
| RESPUESTA | | | DQO | | |

Tabla 5

Secuencia experimental para la aplicación del proceso Electro-Fenton-Fere utilizando el diseño de baja composición de Draper - Lin

| Exp | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | Plan experimentación | | | |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------|---|------|-------|
| | | | | | FeSO ₄ (mg/L) | H ₂ O ₂ (mg/L) | pH | V |
| 1 | + | + | + | - | 1400 | 1000 | 3.5 | 10 |
| 2 | + | + | - | - | 1400 | 1000 | 2.5 | 10 |
| 3 | + | - | + | + | 1400 | 600 | 3.5 | 30 |
| 4 | - | + | - | + | 700 | 1000 | 2.5 | 30 |
| 5 | + | - | - | + | 1400 | 600 | 2.5 | 30 |
| 6 | - | - | + | - | 800 | 600 | 3.5 | 10 |
| 7 | - | + | + | + | 800 | 1000 | 3.5 | 30 |
| 8 | - | - | - | - | 800 | 600 | 2.5 | 10 |
| 9 | -α | 0 | 0 | 0 | 595.462 | 800 | 3 | 20 |
| 10 | +α | 0 | 0 | 0 | 1604.54 | 800 | 3 | 20 |
| 11 | 0 | -α | 0 | 0 | 1100 | 463.641 | 3 | 20 |
| 12 | 0 | +α | 0 | 0 | 1100 | 1136.36 | 3 | 20 |
| 13 | 0 | 0 | -α | 0 | 1100 | 800 | 2.16 | 20 |
| 14 | 0 | 0 | +α | 0 | 1100 | 800 | 3.84 | 20 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | -α | 1100 | 800 | 3 | 3.18 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | +α | 1100 | 800 | 3 | 36.81 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1100 | 800 | 3 | 20 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1100 | 800 | 3 | 20 |

➤ **Optimización del proceso electro-Fenton-Fere**

Cada unidad experimental se ejecuta de acuerdo a la matriz de experimentación, la regulación de pH se logra con adición H_2SO_4 concentrado, se da el tiempo de reacción calculado y luego se detiene con MnO_2 y se neutraliza con NaOH 5M, una alícuota del agua residual tratada es filtrada y diluida si fuera necesario y se introduce 2 mL en un vial de análisis DQO de 0 –1500 ppm, se agita vigorosamente y se coloca en un termoreactor a 150 °C por el lapso de 2 horas, pasado el tiempo de reacción los viales de análisis se enfrían y se efectúan las mediciones de absorbancia a 620 nm en un espectrofotómetro UV — VIS previamente calibrado.

La data obtenida se ordena en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, luego se exporta al software Statgraphics 5.1 plus, donde previamente se elabora el diseño de experimentos seleccionado con sus respectivos códigos y niveles, el software da como respuesta modelos gráficos tridimensionales y proyecciones bidimensionales que mediante la metodología de superficie de respuesta (MSR) se estudia el punto óptimo del proceso electro-Fenton-Fere para la mayor remoción de la DQO teniendo en cuenta los efectos principales e interacciones entre las variables estudiadas.

d.- Velocidad de eliminación de DQO

Para evaluar la cinética de degradación de contaminantes de las aguas residuales estudiadas se aplicaron los parámetros optimizados con el tiempo más adecuado para la reacción, tomándose muestras cada 5 minutos y se analizó la DQO siguiendo los procedimientos ya descritos anteriormente.

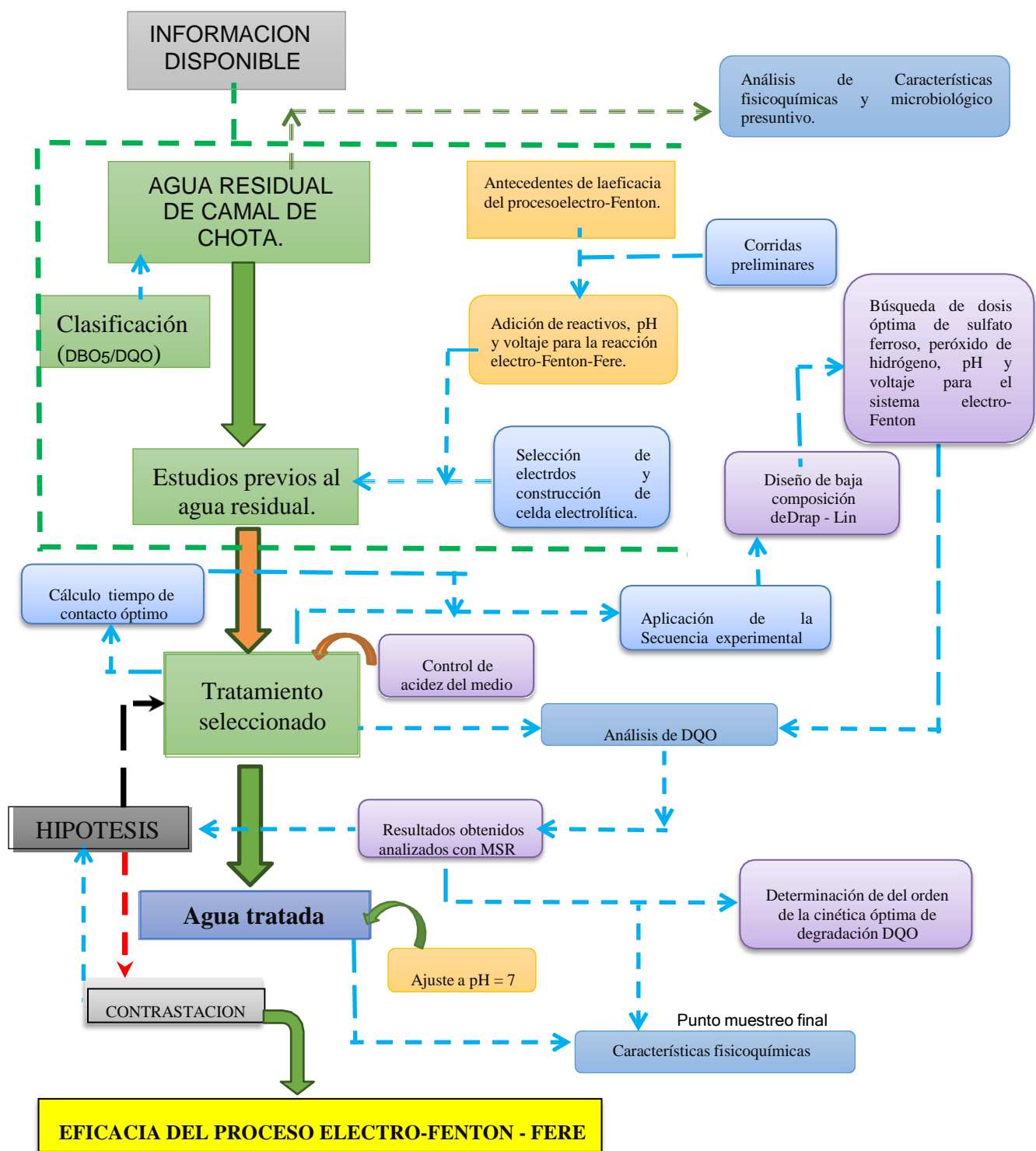
Luego, obtenida la data correspondiente respecto a tiempo y DQO se evalúa mediante la MSR y para el mayor ajuste de regresión en la curva estudiada se elige la ecuación cinética que lo gobierna teniendo en cuenta los fundamentos teóricos correspondientes.

e.- Eficacia del sistema eletro-Fenton

Encontrado los valores óptimos de las variables estudiadas para el proceso electro-Fenton-Fere se realiza una prueba experimental con los datos optimizados siguiendo el modelo matemático para la remoción de la DQO con el tiempo de contacto óptimo calculado, efectuándose luego las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas después del tratamiento. La eficacia del tratamiento con el proceso electro-Fenton-Fere se evalúa en función a las características fisicoquímicas y biológicas iniciales y finales, siendo ésta última las que se deben encontrar dentro de los parámetros establecidos por la legislación peruana.

Figura 2

Descripción del método empleado en la investigación



Nota. Adaptación de los métodos utilizado por Medina et al. (2020) y Cardoso (2020).

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1.- ANTECEDENTES

Décadas atrás las aguas residuales no eran objeto de atención sobre los impactos negativos que éstas pudieran generar, quizás porque se confiaba en la capacidad amortiguadora de la naturaleza para que realice el trabajo de degradación, lo que significaba un equilibrio entre los niveles de contaminantes generados y su asimilación de la misma, sin embargo; hoy ese equilibrio natural está roto y se produce más aguas contaminadas de lo que la naturaleza puede asimilar siendo éste un problema álgido, así por ejemplo las aguas residuales de camales son los contaminantes silenciosos que poco interés se le ha dado y que constituyen uno de los principales focos de infección al suelo y cuerpos de aguas modificando su química y alterando los ecosistemas.(Rodas y Botello, 2016)

Toda actividad antropogénica requiere en su mayoría agua y ello se relaciona con el tipo de procesamiento industrial aplicado tales como remojo, escaldado, producción de vapor, saneamiento, desinfección, lavado etc. (Muñoz y Sánchez, 2018) cuyo fin último es suministrar a la sociedad servicios o productos, pero el gran requerimiento de agua por la industria genera también gran cantidad de aguas residuales donde procedimientos pasados recolectaban las aguas residuales de diversos procesos y se les practicaba un solo tratamiento, sin embargo; es más factible tratar aguas residuales de cada proceso ya que permite aplicar tratamientos óptimos.

Países industrializados ya han comprendido y asumido el reto de minimizar los impactos negativos por aguas residuales a través de medidas de prevención o mitigación mediante tratamientos oportunos puesto que de no ser así se altera el

equilibrio ecológico (Mirshahghassemi et al., 2017), pero cuando ésta responsabilidad es asumida por pequeños municipios se evidencia la carencia de medidas oportunas para su correcto manejo ambiental (Rivera et al., 2018) y ello se complica con la incapacidad económica, técnica y disponibilidad del terreno para aplicar alguna tecnología de tratamiento puesto que entre mayor sea la carga orgánica que recibe un sistema de tratamiento mayor será su dimensión y de acuerdo a las características finales del vertido dependerá del costo de la solución tecnológica implementar.

Hoy en día existen una gama de posibles tratamientos que pueden ser aplicados a las aguas residuales, pero no se tiene una vasta información de aquellas que se hayan utilizado en las que proceden de camales, que en efecto; son muy peligrosas y complejas en su composición química, y ello está asociado a la especie de animal beneficiado, métodos y tecnología utilizada así como procedimientos de limpieza (Becerra et al., 2014), lo preocupante de las aguas residuales de camales es que de no tratarse adecuadamente puede transformarse en un foco infeccioso cargado de vectores, pues lleva consigo restos de una serie de sustancias propio de los animales procesados como proteínas, lípidos, material volátil, aminos, ácidos orgánicos, vísceras, pelos, material lignocelulosico, etc. (Rodas y Botello, 2016).

La tabla 6 muestra una guía de los valores referenciales respecto al índice de biodegradabilidad de las aguas residuales, cuya predicción está en función al rango del valor que adquiere el IB, parámetro indicador que señala el porcentaje de la materia orgánica total presente en el efluente que puede ser descompuesta biológicamente, teniendo en consideración lo descrito, una de las operaciones críticas dentro de las operaciones de faenado es el desangrado (Tabla 7), la sangre al entrar en contacto con el agua puede ejercer una elevada contaminación en el orden de 140 g/L de DBO_5 , así también los restos estomacales y fecales contribuyen a que las aguas residuales

producidas alcancen valores entre los 1000 a 6000 mg/L de DBO₅ y DQO (Tabla 8) la cual se asocia al nivel de tecnificación de las instalaciones (CAPRE y miembros, 1992).

En tanto, se puede inferir que las aguas residuales de camales constituyen un serio problema que despierta la alarma sobre cómo afrontar su gestión y tratamiento, cuyo fin último es propiciar un entorno saludable minimizando los impactos que éstas puedan producir. Varios procedimientos químicos han sido estudiados como la adición de una solución de hidróxido de calcio con sulfato de aluminio sobre una agua residual de camal con una DBO₅ de 854 mg/L y una DQO de 1758 mg/L consiguiendo remover alrededor de 75% de los contaminantes a un pH = 10,2, concluyéndose que se debe controlar los contenidos rumiales, fecales y pelos para que los niveles de carga orgánica no sean excesivos (Quille y Donaires, 2013).

Tabla 6

Valores referenciales del índice de biodegradabilidad (IB) del contenido orgánico en aguas residuales

| Indicador | Evaluación |
|-------------------------|---------------------------------|
| DBO / DQO > 0,60 | Fácil biodegradación |
| DBO / DQO ≈ 0,41 – 0,59 | Parcial biodegradación |
| DBO / DQO < 0,4 | Recalcitrante, no biodegradable |

Fuente: Jurado (2009)

Tabla 7

Operaciones efectuadas durante el faenado de animales en el camal municipal de Chota y su asociación en la generación de aguas residuales

| Operación | Contaminantes del agua residual |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Izamiento y Limpieza | Restos fecales, orina y polvo |
| Degollamiento | Presencia de sangre |
| Desollamiento | Presencia de sangre |
| Evisceración | Restos fecales, grasas |
| Corte y limpieza de cuerpo | Restos de sangre |
| Limpieza de área de trabajo | Restos sangre y tensoactivos |
| Depilación, Chamuscado | Pelusa |

Tabla 8*Medición referencial de contaminantes en aguas residuales de camales*

| Unidad de referencia | DBO ₅ (mg/L) | DQO (mg/L) | Volumen usado (L) |
|--|----------------------------|---------------|------------------------|
| Sacrificio de una unidad de ganado mayor (unares en especial) con procesamiento de intestinos. | 1000 – 3500 | 1400 – 5000 | 500 – 1000 |
| Sacrificio de una unidad de ganado menor (un cerdo en especial) | 200 – 350 | 300 – 600 | 100 – 300 |
| Sacrificio de aves, referido a 1Kg de peso. | 7 – 20 | 10 – 40 | 10 – 30 |
| Procesamiento de una unidad de ganado mayor. | 1000 – 1400 | 1400 - 2000 | 1000 – 1500 |
| Procesamiento de una unidad de ganado menor. | 300 – 400 | 400 – 600 | 300 – 400 |

Nota. Datos extraídos de CAPRE y sus miembros (1992).

Becerra et al. (2014) efectuaron estudios de caracterización a 6 camales y encontraron elevados los parámetros establecidos en la normativa peruana así como también presencia de microorganismos patógenos, advierten que las grasas y aceites en este rubro es de importancia en especial la fracción suspendida, ya que el exceso constituye un problema serio para los tratamientos biológicos. Además mencionan que gran porcentaje de estas aguas contaminadas son utilizados para riego de vegetales o consumo para animales por lo que se ha de considerar las condiciones de calidad para evitar contaminación por microorganismos. Concluyeron que el IB está por encima de 0,6 lo que permite inferir que la materia orgánica es biodegradable.

Borja et al. (2019) establecen que la relación promedio del consumo de agua en operaciones de faenado por animal sacrificado está en promedio de un 0,26 m³ para porcinos, 0,67 m³ bovino y 0,17 m³ ovinos, los análisis practicados revelan que se alcanzó una DQO y DBO₅ de 9280 mg/L y 4500 mg/L en el área de bovinos y 872 mg/L y 450 mg/L en el área de ovinos respectivamente. Además sugieren un mejor manejo en el uso del agua para evitar gastos innecesarios ya que el proceso de faenado requiere un alto consumo de agua por las veces del lavado practicado y el

mantenimiento de las condiciones de higiene.

En función al panorama dado se puede decir que las aguas residuales de camales se enmarcan en un problemática ambiental de consideración, donde urge mirar hacia novedosos métodos de tratamiento que representen una solución eficaz, para ello; las tecnologías avanzadas de oxidación (TAO) son una de las opciones más prometedoras en la actualidad, pero aún en nuestro medio la información y aplicación es limitada, siendo el proceso Fenton con sus variantes, las tecnologías con mayor proyección de uso, ya que varios investigadores han propuesto el mecanismo de reacción donde la dosis de Fe^{+2} y H_2O_2 , pH, temperatura y sustancias intervinientes regulan la efectividad del proceso. (Gilpavas et. al., 2017; Rubio-Clemente et al., 2014; Sun et al., 2014).

A pesar de las propuestas y efectividad comprobada para eliminar contaminantes aun de difícil degradación existen discrepancias entre investigadores por el mecanismo de las reacciones Fenton (García, 2016), así; una variante de los procesos Fenton es la utilización de celdas electroquímicas cuyo sistema se fundamenta en la transferencia de electrones (Oturán y Aaron, 2014), generan una reacción oxidante sinérgica no selectiva dando lugar a un sistema electro-Fenton (Brillas y Martínez-Huitle, 2015) cuyo sistema resuelve muchos inconvenientes existentes en el Fenton clásico, además de ser amigable con el ambiente, compatible, alta eficiencia energética, versatilidad y posibilidad de automatización ocupan un mínimo espacio comparado con otras técnicas de tratamiento.

La aplicación de los sistemas electro-Fenton son procesos ambientalmente amigables y se ha orientado con mayor interés en el mejoramiento de la calidad de agua y aguas residuales con pesticidas, colorantes, herbicidas, fenoles, lixiviados, drogas y aguas contaminadas con altas cargas orgánicas (Pushpalatha y Krishna,

2017), ya que presenta buena performance en el tratamiento haciendo factible una eventual tratamiento biológico posterior para casos de aguas residuales con material recalcitrante lo que ha despertado gran interés en tiempos recientes para conocer más a fondo su efectividad.

Pourzamani et al. (2018), estudiaron la eliminación electroquímica de diclofenaco en solución acuosa utilizando electrodos de $\text{Ti} / \text{TiO}_2 - \text{RuO}_2$ y nanopartículas de magnetita, mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta basado en un diseño compuesto central encontraron una relación empírica entre respuesta y variables independientes a través de una ecuación polinomial cuadrática. Concluyeron que a un pH óptimo fue de 5,56, densidad de corriente de $19,74\text{mA}/\text{cm}^2$, en un tiempo de 82,24 minutos obteniendo una remoción 98.52 % considerando una alternativa viable para tratar aguas contaminadas con diclofenaco.

Alizadeh y Barkdoll (2018) manifiestan que el proceso electro-Fenton se ha utilizado ampliamente para eliminar contaminantes de efluentes acuosos, evaluaron el electro-Fenton-Persulfato, electro-Fenton-Oxalato, electro-Fenton-Fenton y electro-Fenton sobre la aplicabilidad en la degradación de ketoprofeno como contaminante emergente. Las pruebas experimentales por lotes mostraron que se tiene buena performance de remoción del contaminante y que la especie radical dominante es el OH^* así también los análisis de la relación $\text{DBO}_5 / \text{DQO}$ demostraron que todos los sistemas estudiados mejoraron la biodegradabilidad. Concluyeron que los sistemas electro-Fenton proporciona buenas soluciones para disminuir la carga y el riesgo que representa el ketoprofeno para los sistemas de agua.

Hammouda et al. (2016) evaluaron la eliminación de una sustancia que ha concentraciones moderadas tiene un intenso olor fecal debido a la presencia de indol,

para ello utilizaron como catalizador hierro inmovilizado en perlas de alginato a fin de llevar a cabo una reacción electro-Fenton. Los resultados experimentales demostraron que el indol se eliminó eficazmente con el proceso electro-Fenton y que la adición de radiación UVA no es relevante ya que solo mejoraría ligeramente el rendimiento de remoción.. Las condiciones de operación fueron: pH = 3, concentración de 200 mg/L de Fe – Alginato, 0,53 mA/cm² y un tiempo de 60 minutos para degradar 20 mg/L de indol siguiendo una cinética de pseudo-primer orden.

Arivazhagan y Tuvakara (2015) realizaron ensayos a nivel de laboratorio para tratar compuestos orgánicos altamente concentrados de los efluentes de lavado gastado de destilerías mediante métodos oxidativos por lotes. Se utilizó una dosis de reactivo de Fenton entre 5 – 40 mg/L a un pH entre 2 a 10, intensidad de corriente entre 1 a 5 A, tiempo entre 30 minutos a 4 horas, velocidad entre 100 – 500 RPM y distancia entre electrodos 0,5 a 4 cm. Los resultados de la aplicación del proceso electro-Fenton revelaron que se alcanzó decolorar un 44% utilizando electrodos de grafito a una distancia de 0.5 cm entre electrodos a un pH de 3, con intensidad de corriente de 4A, velocidad de 400 rpm, tiempo de 3 horas, y una concentración de 20 mg/L de Fe⁺².

Ulucan y Kurt (2015) investigaron la tratabilidad del agua de sentina mediante el tratamiento electro-Fenton, consideran que al mezclarse el agua de mar con el agua de sentina el contenido de cloruro incrementa altamente la conductividad, lo que se transforma en una gran ventaja en términos de tratamiento electroquímico de aguas residuales. Utilizaron electrodos de aluminio y hierro a un pH entre 2 a 4, 7,5 mA/cm² para un tiempo corto de reacción igual a 10 minutos, la remoción de la DQO y eliminación de aceite - grasas fueron de 71% y 69%, respectivamente bajo una cinética de pseudo segundo orden, cuyo costos de electricidad en términos

económicos está en el orden de 0,51 \$/m³.

Zhang et al. (2019) menciona que el pH es un parámetro muy sensible en los procesos Fenton y sus variantes puesto que a valores bajos el efecto de barrido de OH* por H⁺ se vuelve más fuerte, lo que se traduce en una disminución de la capacidad de oxidación, por ende el pH óptimo oscila entre 2 a 4. En similar medida el H₂O₂ también es un parámetro muy importante que afecta la degradación de los contaminantes orgánicos ya que si éste aumenta la eficiencia de degradación de contaminantes también aumenta, sin embargo; no puede ser añadido indiscriminadamente ya que se puede producir un efecto de barrido de los radicales OH* por H₂O₂. Concluyeron que para obtener un máximo rendimiento en la aplicación de las tecnologías Fenton es necesario la optimización para aminorar los costos económicos.

Yazici et al. (2019) estudiaron la eficacia del proceso electro-Fenton sobre lixiviados concentrados biológicamente estabilizados utilizando electrodos de hierro en un reactor electrolítico discontinuo, obtuvieron una remoción del 60,2% del COT, 69,4% de la DQO y 87,6% en el color operando a las condiciones óptimas del proceso donde el pH = 2,8 fue esencial para la reacción en la mayor generación de radicales OH* ya que a pH > 5 el sistema se hace ineficiente. Sugieren que el proceso Electro-Fenton puede ser un método eficaz para convertir la DQO no soluble en DQO soluble y eliminar la DQO no biodegradable, recomendando que el proceso puede ser usado como post-tratamiento.

Gilpavas et al. (2014) optimizaron un proceso de electro-oxidación para tratar aguas residuales contaminadas con colorante tartrazina, usaron un electrodo de diamante dopado con boro y otro de titanio en configuración monopolar y a través de la MRS optimizaron los parámetros de estudio hallando una concentración inicial del

contaminante de 30 ppm, $5\text{mA}/\text{cm}^2$ y $\text{pH} = 6$, empleando para las pruebas de experimentación y estudio cinético tiempos de 15 y 30 minutos respectivamente. Añadieron sales ferrosas al sistema señalado transformándolo en un sistema electro-Fenton y detectaron que la degradación en los primeros minutos es más lenta que en la electro-oxidación, sin embargo; al final del tratamiento apreciaron similares cantidades de eliminación de contaminantes pero en el proceso electro-Fenton se notó mayor eficiencia.

Escalante y Bandala (2014) revelaron que las ventajas de aplicar sistemas electro-Fenton comparado con los tratamientos Fenton clásico radica en que en el sistema electroquímico de oxidación indirecta puede producirse in situ H_2O_2 , mejor control de la cinética de degradación, incremento de la eficiencia de degradación por el Fe^{+2} regenerado en el cátodo, conduciendo a una disminución de residuos y la proximidad hacia una total mineralización con los parámetros optimizados a costos bajos, además de un eventual control de virus, bacterias patógenas y esporas hasta niveles de inactivación.

La performance del proceso electro-Fenton en aguas residuales contaminadas con pesticidas fue estudiada por Moussavi y Aqanaghad (2015), las aguas eran altamente recalcitrantes con una DQO próxima a los 6040 mg/L. Evaluaron el tiempo de reacción, pH, cantidad de reactivos y densidad de corriente concluyendo que la optimización de dichos parámetros se puede lograr una remoción de DQO de 96% con un tiempo de reacción de 46 minutos, la que favoreció un incremento del IB de 0 a 0,37, recomendando al proceso electro-Fenton como una alternativa de pre-tratamiento.

Zahra et al. (2015) estudiaron la performance del proceso electro-Fenton en la eliminación del pentaclorofenol en aguas residuales, observaron el comportamiento

de los efectos de las variables operacionales principales y sus interacciones, concluyendo que la distancia óptima entre electrodos para obtener la máxima remoción de pentaclorofenol es de 3 cm, pH de 3, un voltaje de 24 voltios, y un tiempo de tratamiento de 40 minutos, recomendaron esta tecnología por la eficacia para remover material recalcitrante.

A pHs alcalinos la efectividad de los procesos Fenton Homogéneo no está garantizada, ya que el H_2O_2 pierde estabilidad y se promueve su descomposición disminuyendo la potencialidad oxidativa, asimismo; el Fe^{+2} tiende a precipitar, la máxima efectividad de remoción de contaminantes puede lograrse a un pH entre 2 y 3, pero se debe tener en cuenta que dosis elevada de iones Fe^{+2} y H_2O_2 incentivan reacción competitivas siendo una de éstas la producción del radical (HO_2^*) que comparado con el radical (OH^*) posee una capacidad oxidativa mucho menor, pero ello puede minimizarse con un adecuado control del proceso, que se traduce en la factibilidad económica ya que las reacciones de Fenton y sus variantes muestran un rendimiento de remoción de color y DQO satisfactorio (Cruz-González et al., 2017).

Rahmani et al. (2015) estudiaron la efectividad del sistema electro-Fenton para remover cromo (VI) de aguas residuales, donde el cromo es considerado como uno de los contaminantes muy peligrosos por sus características mutagénicas y carcinogénicas. Usaron electrodos de hierro y evaluaron los parámetros pH, voltaje, dosificación de H_2O_2 , contenido inicial de cromo y de cianuro como ion de interferencia. Concluyeron que la máxima eficiencia de remoción de cromo fue de 97 % en 25 minutos empleando 50 mL/L de H_2O_2 , 30 V y pH = 3, lo que sugieren al sistema electro-Fenton como un tratamiento efectivo.

Varios estudios advierten sobre la efectividad e interés que ha adquirido la

aplicación del proceso electro-Fenton en aguas residuales, donde la formación de lodos compuesta por las sustancias degradadas e hidróxidos férricos debe ser vigilada durante el proceso homogéneo mediante la dosificación de reactivos, temperatura y pH a fin de reducir el impacto por lodos y efecto barrido de (OH^*) por H_2O_2 , en tanto; investigaciones actuales han centrado esfuerzos en mejorar los inconvenientes y avizoran resultados favorables y prometen su eficacia en el tratamiento de aguas residuales, (Brillas y Martinez-Huitle, 2015; Fontmorin y Sillanpaa, 2015; Medina et al. 2020).

Sedagat et al. (2016) señala que el sistema electro-Fenton puede abrir con gran eficiencia anillos de compuestos aromáticos incluso moléculas condensadas hacia una degradación parcial o total, evaluó la eficiencia utilizando electrodos de grafito obteniendo un 59,23 % en la degradación del imidacloprid a un pH de 2,8 y 0,36mM de Fe^{+2} , concluye que ésta tecnología es prometedora donde los métodos convencionales y aun algunos POAS tienen limitaciones, las que pueden superarse mediante la combinación de tratamientos que ofrezcan efectos sinérgicos para reducir tiempos de operación y costos .

De acuerdo a la posición de diversos autores se puede aseverar que los procesos electro-Fenton homogéneo presentan máxima actividad catalítica a pH próximo a 3 con una densidad de corriente adecuada, las variaciones en el pH puede reducir la efectividad del proceso y la precipitación del Fe^{+3} se ve favorecida a pHs por encima de 4, en éstas condiciones se propician la formación de complejos de Fe^{+2} cuya presencia se ve disminuida en el medio y el H_2O_2 va perdiendo estabilidad y capacidad oxidativa debida a su descomposición hacia O_2 y H_2O . Condiciones de pH por debajo de 3, inhiben la reducción del Fe^{+3} a Fe^{+2} , sin embargo; esta regeneración se compensa por la reacción de electro- reducción.

Mirshahghassemi et al. (2017) estudiaron la efectividad del sistema electro-Fenton en aguas residuales del lavado de autos, las que contienen grandes cantidades de materia orgánica, grasas, aceites, fosfatos, detergentes y ácido hidrofúorico, observaron que en el sistema electro-Fenton suceden simultáneamente la oxidación Fenton y electro-coagulación. Cuando el pH supera el valor de 3, se forman iones activos de $(FeOH)_3$ que tienen una baja tendencia a reaccionar con el H_2O_2 , la cantidad de corriente eléctrica y tiempo de reacción favorece los niveles de remoción de contaminantes. Mediante la aplicación de la MRS concluyeron que el pH óptimo, densidad de corriente, tiempo de reacción y dosis de H_2O_2 fue de 3, 2 A, 10 minutos y 500 mg/L, removiendo alrededor de un 85,6 % de la DQO.

Pushpalatha y Krishna (2017) señalan que el pH tiene un gran impacto en la aplicación del proceso electro-Fenton, la máxima remoción se logra a pH = 3, la temperatura y la densidad de corriente aplicada también influyen en el proceso, el incremento excesivo de temperatura provoca la disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes, en cambio, cuando la densidad de corriente se incrementa la eficiencia se ve favorecida, pero tiene la desventaja de mayor consumo de energía. Los sistemas electro-Fenton resuelven algunos problemas generados en el proceso Fenton convencional por la continua electro-reducción del Fe^{+3} a Fe^{+2} en el cátodo. A pH 3 el tiempo de reacción es inversamente proporcional a la fuerza eléctrica usada y la temperatura recomendable a emplear debe estar entre los 20°C a 30 °C.

Adimi et al. (2017) manifiestan que el sistema electro-Fenton tiene un complejo mecanismo de reacción, el propósito es generar radicales (OH^*) que tienen un tiempo de vida de 8 a 10 segundos y cuyo tiempo es suficiente para atacar una amplia gama de contaminantes de manera no selectiva, pero ha de tenerse en consideración el

tiempo óptimo de reacción total que garantice una concentración continua de radicales OH^* , tiempos largos de tratamiento quizá no influya significativamente en la eficiencia de remoción de la DQO y esto puede elevar los costos del proceso. Concluyeron que para tratar aguas residuales de origen petroquímico con electro-Fenton el pH óptimo fue de 2,96, tiempo de 89,51 minutos, densidad de corriente de 69,57 mA relación molar de H_2O_2 / Fe^{+2} de 3,42 logrando una remoción de 65% de la DQO.

Si bien la aplicabilidad del proceso electro-Fenton es efectiva para tratar contaminantes en aguas residuales uno de las limitantes pueden ser los costos operacionales del proceso en cuanto a energía a utilizar, ya que depende del tipo y concentración del contaminante a tratar (Fernández et al., 2014), pero ello puede ser compensada con la asociatividad con otros mecanismos limpios que la producen tales como la energía solar, combustibles de células microbianas, aelóica, etc. que implican bajos costos de producción de la fuente energética, pero el mayor ahorro económico radica en la optimización del sistema.

2.2.- BASES TEÓRICAS

2.2.1.- Procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA)

En años recientes los PEOAs han despertado gran interés por la versatilidad y eficacia que estos métodos poseen en el campo de las aguas residuales, el diseño estructural implica una celda electroquímica y electrodos donde circula corriente eléctrica, suscitándose una serie de reacciones que provocan la transferencia directa del electrón a la reducción u oxidación de la sustancia contaminante, o por reacción química con sustancias electro-generadas adheridas al electrodo.

Los PEOAs se dan mediante transferencia de carga entre un electrodo y un electrolito, pero para que se desarrollen reacciones tiene que darse la polarización de los electrodos mediante un diferencial de potencial que propicia la movilización de electrones desde la zona más negativa hacia la más positiva provocando un intercambio de éstos con los contaminantes. La eficacia depende de la conductividad de la solución, tipo, área y distancia entre electrodos y éstas pueden ser homogéneas o heterogéneas, dependiendo si se da en el seno de la solución o sobre el electrodo siendo los procesos más importantes: Transporte de masa y transferencia de electrones (Brillas y Martínez-Huitle, 2015).

Estos procesos en su conjunto forman sistemas de tratamientos que se fundamentan en la formación *in situ* de radicales OH^* en cantidades suficientes para oxidar sustancias orgánicas de manera no selectiva en medio acuoso causando cambios profundos en la estructura química, cuyos principales objetivos radican en la desinfección, eliminación de color y olor mediante la descomposición de los contaminantes en sustancias más fácilmente biodegradables con posibilidad a posteriores tratamientos biológicos, o en su defecto hacia la mineralización total hasta CO_2 y agua (Chiva et al., 2017).

En la tabla 9 se puede apreciar el alto poder de oxidación de OH^* que lo ubica en el segundo lugar por encima del oxígeno atómico (O_2). En efecto, los sistemas electro-Fenton se han mostrado muy efectivos en tratamientos de aguas muy contaminadas incluso con material recalcitrante por lo que lo hace atractivo y prometedor. Los PEOA se clasifican en función a como se puede obtener los radicales hidroxilos (OH^*) que en esencia es la especie responsable de los procesos oxidativos, la figura 3 expresa una clasificación de los diferentes sistemas electroquímicos que pueden utilizarse para tratar aguas residuales.

Tabla 9

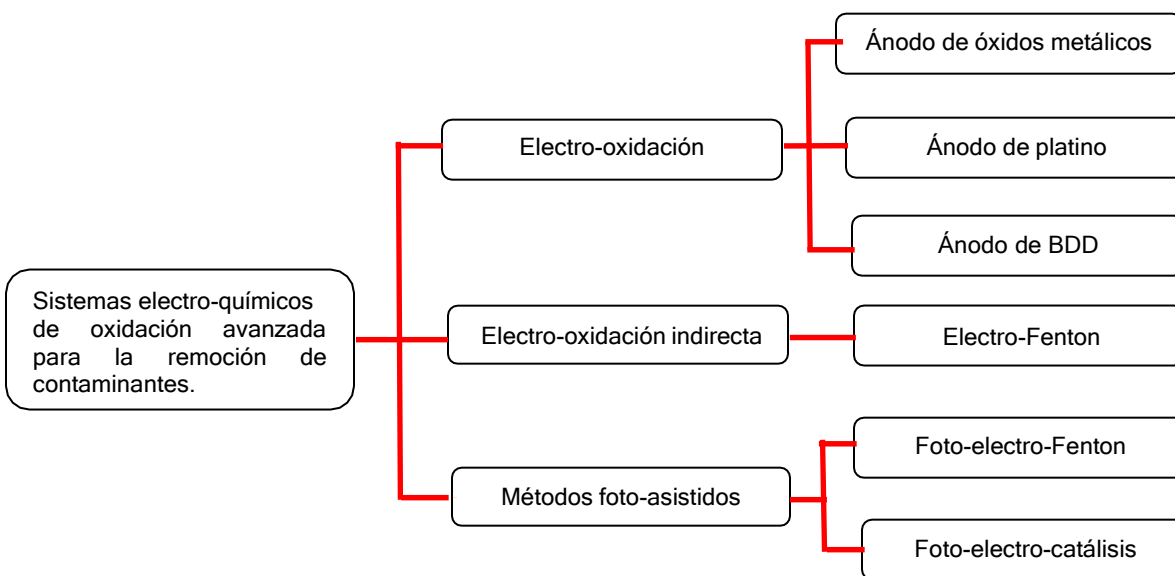
Potenciales de Oxidación estándar frente al electrodo estándar de hidrógeno de algunos oxidantes químicos en medio ácido a 25 °C

| OXIDANTE | E°(V) |
|--|-------|
| Fluoruro (F ⁻) | 3,03 |
| Radical hidroxilo (OH [*]) | 2,80 |
| Oxígeno atómico (O ₂) | 2,42 |
| Ozono (O ₃) | 2,07 |
| Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) | 1,78 |
| Acido hipocloroso (HClO) | 1,49 |
| Cloro (Cl ₂) | 1,36 |
| Yodo (I ₂) | 0,54 |

Nota. Cruz-González et al. (2017)

Figura 3.

Alternativas de utilización de procesos electroquímicos de oxidación avanzada en aguas residuales



Nota. Adaptado de Brillas y Martínez-Huitle (2015)

2.2.2.- Reactivo de Fenton

➤ Fierro

Metal maleable, dúctil y de color blanco plateado, excelente conductor del calor, su presencia bajo la forma de sales es de gran utilidad, así las sales férricas presentan mejor estabilidad que las ferrosas en medio acidificado pero

en medio alcalino pueden precipitar bajo la forma de hidróxidos con una coloración pardo rojizo. La oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} en presencia de H_2O_2 propicia la producción de radicales OH^* en medio acuoso ácido (Kuleyin et al., 2021). La tabla 10 presenta los límites de predominancia para las diversas especies así como el potencial en dependencia del pH. En la figura 4 se visualiza las zonas dominadas para las diversas especies formadas por el Fe: zona de pasivación, zona de inmunidad y tres zonas de corrosión.

Tabla 10

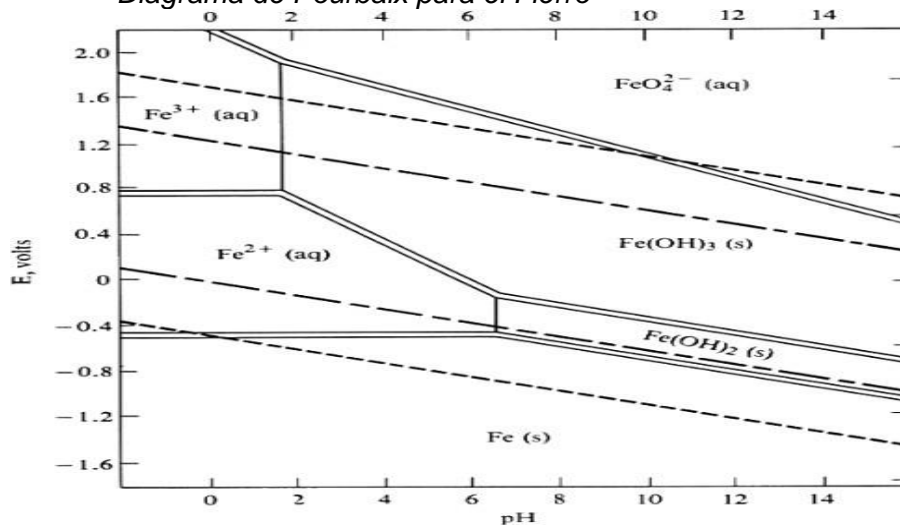
Límites de predominancia para algunas especies del Hierro

| Especies Químicas | Potencial en función del pH |
|---|------------------------------------|
| $\text{Fe}^{+2} / \text{HFeO}_2^-$ | $\text{pH} = 10,53$ |
| $\text{Fe}^{+3} / \text{FeOH}^{+2}$ | $\text{pH} = 2,43$ |
| $\text{FeOH}^{+2} / \text{FeOH}_2^-$ | $\text{pH} = 4,69$ |
| $\text{Fe}^{+2} / \text{Fe}^{-3}$ | $E_0 = 0,771$ |
| $\text{Fe}^{+2} / \text{FeOH}^{+2}$ | $E_0 = 0,914 - 0,0591 \text{ pH}$ |
| $\text{Fe}^{+2} / \text{Fe(OH)}_2^-$ | $E_0 = 1,197 - 1,182 \text{ pH}$ |
| $\text{HFeO}_2^- / \text{Fe(OH)}_2^-$ | $E_0 = -0,675 + 0,0591 \text{ pH}$ |
| $\text{HFeO}_2^- / \text{FeO}_4^{-2}$ | $E_0 = 1,001 - 0,0738 \text{ pH}$ |
| $\text{Fe}^{+3} / \text{FeO}_4^{-2}$ | $E_0 = 1,700 - 0,1580 \text{ pH}$ |
| $\text{FeOH}^{+2} / \text{FeO}_4^{-2}$ | $E_0 = 1,652 - 0,1379 \text{ pH}$ |
| $\text{Fe(OH)}_2^+ / \text{FeO}_4^{-2}$ | $E_0 = -1,559 - 0,1182 \text{ pH}$ |

Nota. Pourbaix 1963 (citado por Chávez 2006)

Figura 4.

Diagrama de Pourbaix para el Fierro



Nota. Pourbaix (1963) (citado por Chávez 2006)

➤ Peróxido de Hidrógeno

También conocido comercialmente como agua oxigenada, a temperatura ambiente es incolora y de olor característico, molécula altamente polar, con una ligera viscosidad respecto al agua. Se descompone lentamente en O_2 y agua y se incrementa ante la presencia de catalizadores liberando oxígeno y calor (Diomedi et al., 2017). La tabla 11 muestra los límites de las especies químicas presentes del H_2O_2 la que está fuertemente ligada a la condiciones de pH y temperatura. La figura 5 facilita una mejor visualización de los límites teniendo observancia en los límites de la descomposición espontánea.

Tabla 11

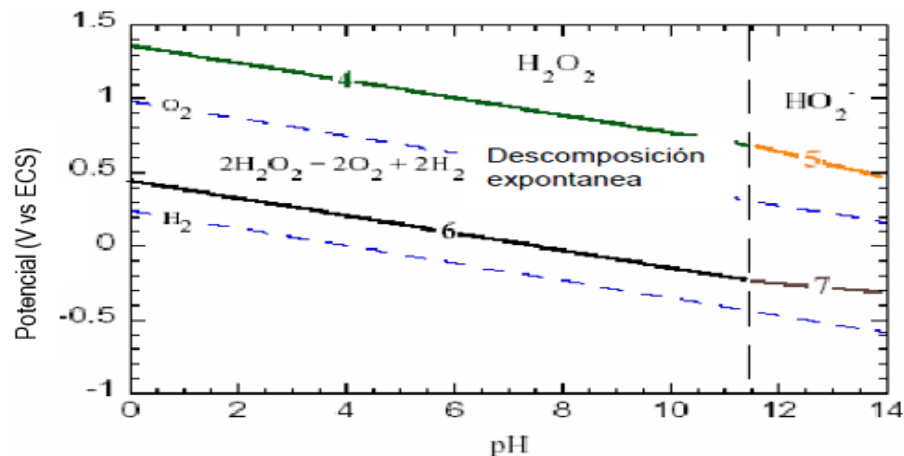
Límites de dominio del peróxido de hidrogeno en función del pH

| Especies Químicas | Potencial en función del pH |
|-------------------|-----------------------------------|
| H^+ / OH^- | pH = 7,00 |
| H_2O_2 / OH_2^- | pH = 11,63 |
| H^- / H^+ | $E_0 = -1,125$ |
| H^- / OH^- | $E_0 = 0,717 - 0,0591 \text{ pH}$ |
| H^+ / H_2O_2 | $E_0 = 1,776 - 0,0886 \text{ pH}$ |
| H^+ / OH_2^- | $E_0 = 2,119 - 0,1181 \text{ pH}$ |
| OH^- / H_2O_2 | $E_0 = 1,362 - 0,0293 \text{ pH}$ |
| OH^- / OH_2^- | $E_0 = 1,706 - 0,0591 \text{ pH}$ |

Nota. Pourbaix 1963 (citado por Chávez 2006)

Figura 5.

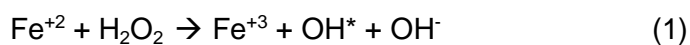
Diagrama de equilibrio electroquímico para el H_2O_2 en agua



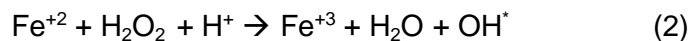
Nota. Pourbaix 1963 (citado por Chávez 2006)

2.2.3.- PROCESO ELECTRO-FENTON

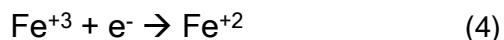
Tiene sus inicios desde casi un siglo y medio de antigüedad cuando Henry John Hortsman Fenton realizó pruebas con H_2O_2 y sales de hierro (Fe^{+2}) para degradar sales de ácido tartárico dando lugar a lo que hoy se denomina como la reacción de Fenton, dicha reacción abrió nuevas expectativas de destrucción de una variedad de contaminantes en condiciones ácidas por oxidación a condiciones ambientales. El inicio de la reacción en medio acuoso se da de la siguiente manera (Vilardi et al., 2020):



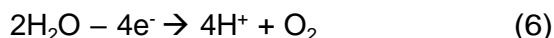
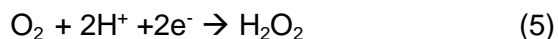
La reacción mostrada en un medio ácido origina los radicales (OH^*) y la ecuación 1 puede escribirse de acuerdo a la ecuación 2, Donde el control de pH requiere cuidado y debe estar cercano a 3, para ello requiere una cantidad catalítica determinada de Fe^{+2} cuyo ion puede ser regenerado según la reacción 3 (Sani et al., 2020):



Sin embargo; dicha reacción de regeneración es muy lenta para que Fe^{+2} vuelva a tomar la reacción (1) y generar nuevo radicales hidroxilos puesto que hay reacciones parasitarias e improductivas, donde el Fe^{+3} va apareciendo en la medida que el Fe^{+2} se consume hasta que la reacción de oxidación tiende a detenerse. Pero esta limitación es superada si se utiliza una celda electroquímica donde la reacción Fenton clásica se transforma en una reacción electro- Fenton, donde el Fe^{+2} sufre una regeneración en el cátodo de acuerdo a la reacción 4 con lo que se evita de esta manera la acumulación de iones Fe^{+3} en el medio (Kuleyin et al., 2021).



En estas condiciones se propicia una gran mejoría en la ecuación 1 y por ende la producción de lodos se reduce en gran medida optimizándose la producción de OH^* para asegurar la degradación de contaminantes. En la reacción electro-Fenton el H_2O_2 se adiciona continuamente sobre la solución ácida mediante la reducción del oxígeno (ecuación 5), así también el oxígeno necesario para la producción de H_2O_2 puede ser generado a través de la oxidación del agua que ocurre en el ánodo de acuerdo a la ecuación 6 (El - Doseky et al., 2010):

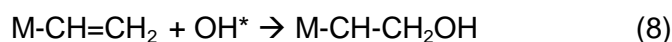


Sin embargo a pesar de la robustez del proceso electro-Fenton ésta puede verse limitada a no lograr la mineralización total por la formación de sustancias secundarias que pueden formar complejos de Fe^{+3} -carboxílico incapaz de ser atacado por los radicales OH^* (Ruíz et al, 2011). Para el caso de compuestos aromáticos la hidroxilación es lo primero que ocurre, luego; se ocasiona la ruptura de los enlaces durante la oxidación (Rubio-Clemente et al., 2014). Los mecanismos de reacción que se pueden llevar a cabo en los tratamientos de aguas residuales mediante el proceso electro-Fenton son:

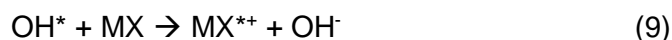
- Abstracción del hidrógeno de átomos de carbono alifáticos.



- Adición electrofílica a enlaces dobles o anillos aromáticos.



- Reacciones de transferencia de electrones.



- Interacción radicalaria



2.2.4.- Parámetros críticos en el sistema electro-Fenton

➤ pH

El pH juega un rol importante en la reacción, el gran impacto destructivo de moléculas contaminantes depende de ello ya que controla la variación del fierro y los radicales hidroxilos generados. El proceso electro-Fenton ocurre con mayor eficacia a un pH cercano a 3 con una excelente conductividad (Rahmani, et al., 2015). A un pH por debajo de 2 la eficacia se ve reducida por la generación de $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ y $[\text{H}_3\text{O}_2]^{+2}$. El pH aumenta con el incremento del tiempo de reacción, pero ha de tenerse cuidado de que no se eleve demasiado ya que precipita el fierro reduciéndose la concentración de fierro disuelto (Pushpalatha y Krishna, 2017).

➤ Temperatura

Un incremento en la temperatura puede afectar negativamente la eficiencia de eliminación de contaminantes mediante el proceso electro-Fenton, la concentración de H_2O_2 disminuye con el incremento de la temperatura ya que la concentración de oxígeno disuelto decrece y se acelera su descomposición en agua y oxígeno y ésta reacción se ve duplicada por cada 10°C de incremento. Temperaturas muy altas o muy bajas afectan la eficiencia de remoción de contaminantes, la temperatura óptima esta entre 20 y 30 °C (Zhang et al., 2014)

➤ **Densidad de corriente**

El incremento de la densidad de corriente conlleva a un mayor consumo energético y con ello la eficiencia de remoción. La corriente aplicada está directamente relacionada con el costo del proceso electro-Fenton, en tanto el consumo de energía en dicho proceso es siempre bajo en valores cercanos a 10 A/m^2 , pero la aplicación de altos niveles de corriente implica una mayor electro-regeneración de los iones férricos en ferrosos, sin embargo; ha de tenerse en cuenta que la eficiencia también puede verse afectada después de un valor límite de corriente aplicada debido a reacciones competitivas en el electrodo que pueden inhibir las reacciones principales. (Yazici et al., 2019).

➤ **Concentración de Fe^{+2}**

El ion Fe^{+2} constituye uno de los parámetros de importancia, si la concentración incrementa, la concentración de radicales OH^* generados vía reacción Fenton también aumenta, así; el proceso electro-Fenton puede operar en condiciones óptimas con pequeñas cantidades iniciales de Fe^{+2} catalítico con altos niveles de remoción de contaminantes. Altas concentraciones de Fe^{+2} puede disminuir la relación de degradación afectando la cinética del proceso, es por ello que concentraciones por encima de 500 mg/L de Fe^{+2} los radicales (OH^*) producidos pueden ser secuestrados por otras reacciones improductivas provocando una merma en su efectividad pero esto depende del contaminante a tratar. (Pushpalatha y Krishna, 2017).

➤ **Concentración de peróxido de hidrógeno**

La concentración de radicales (OH^*) se ve favorecida por el incremento

de H_2O_2 y por tanto se observa una mejora en la remoción de la DQO. Concentraciones de H_2O_2 por encima del valor óptimo la eficiencia de eliminación de la materia orgánica disminuye debido a la captación de radicales OH^* y la recombinación de estos por efecto del H_2O_2 (Yazici et al., 2019). En cambio; bajas concentraciones de H_2O_2 no influye en la relación de remoción de COT, pero ha de tenerse cuidado en los excesos de H_2O_2 ya que puede provocar la flotación de lodos producto de la auto-descomposición del peróxido excedente así como también provocar reacciones secundarias no deseadas (Pushpalatha y Krishna, 2017).

➤ **Distancia entre electrodos**

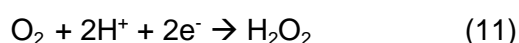
Este parámetro afecta la eficiencia general de los procesos de electro-Fenton, ya que gobierna el potencial del sistema y el consumo de energía. Una reducción en la distancia entre electrodos conduce a una resistencia reducida entre los electrodos y un mayor flujo de corriente. El tiempo de viaje de los iones que participan en las reacciones aumenta con el incremento de la distancia de los electrodos y da como resultado una electrólisis de mayor duración y menor eficiencia de eliminación. Para evitar un corto circuito entre ánodo y cátodo los electrodos deben ponerse en distancias próximas entre 1,3 cm y 2,1 cm, distancias muy cortas o muy largas disminuyen la eficiencia de remoción de la DQO. (He y Zhou, 2017; Nidheesh y Gandhimathi, 2012).

2.2.5.- Categorías de los sistemas electro-Fenton

Pueden dividirse en tres categorías:

- **Proceso electro-Fenton**

En esta primera categoría el H_2O_2 es formado por la reducción del $\text{O}_{2(\text{g})}$ disuelto sobre la superficie del cátodo en una celda electrolítica de acuerdo a la reacción 11 (Qiu et al., 2015) luego el peróxido formado reacciona con el catalizador de hierro agregado externamente para formar los radicales hidroxilos (OH^*). Los Fe^{+2} consumidos en la reacción de Fenton son regenerados por reducción catódica, bajando significativamente las concentraciones iniciales de Fe (reacción 12).



Para la electro-generación del H_2O_2 se pueden usar como cátodos electrodos de difusión de gas (Barros et.al., 2014), grafito, electrodos tridimensionales como fieltro de carbono (Celebi et al., 2015), fibra de carbono activado (Lei et.al., 2010) y carbono reticulado vítreo (Ghoneim, 2011).

- **Electro-Fenton - Fere**

En esta categoría ambos componentes del reactivo de Fenton pueden ser añadidos externamente dentro del reactor a pH ajustado previamente. El ion Fe^{+3} formado durante la reacción puede ser convertido a Fe^{+2} por reducción catódica según la ecuación 12.

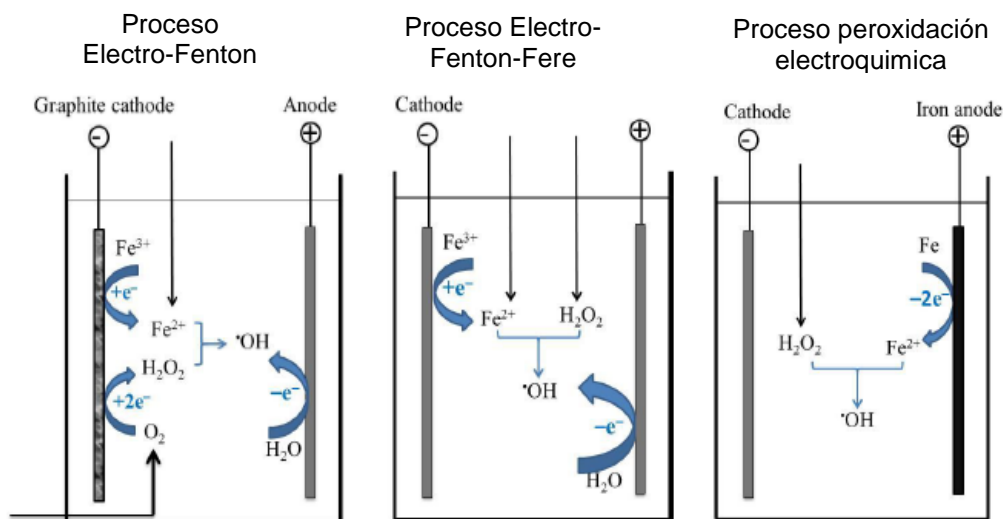
- **Peroxidación electroquímica**

En este proceso se usa un ánodo de sacrificio de hierro para electro-generación del Fe^{+2} desde una disolución anódica de acuerdo a la ecuación 13, El peróxido de hidrógeno puede ser añadido externamente al reactor y la coagulación del $\text{Fe}(\text{OH})_3$ forma precipitados que depende del pH y de la corriente aplicada.



Figura 7

Representación de las categorías de los Procesos electroquímicos de oxidación avanzada



Nota. La figura muestra los procesos electroquímicos basados en el reactivo de Fenton. Fuente: Heng (2015)

CAPITULO III

RESULTADOS DE LA INVESTIGACION

El presente capítulo contiene el tratamiento de los datos y resultados experimentales, los cuales se llevaron a cabo mediante la utilización de herramientas de Microsoft Excel y del software Statgraphics 5.1 plus de acuerdo a la estrategia experimental planificada. Se analizó el proceso electro-Fenton-Fere ya que esta categoría ofrece la facilidad de manejo y control de los reactivos de Fenton puesto que son adicionados al sistema. Se utilizaron materiales de acero y grafito como ánodo y cátodo respectivamente en una celda electroquímica, así también se reportan la interacción de los factores estudiados y la ecuación matemática que explica el efecto de dichos factores en el sistema. Se realiza la discusión a los resultados y se indica la mejora del índice de biodegradabilidad y las respectivas interpretaciones.

3.1.- Análisis e interpretación de los datos

3.1.1.-Tiempo de reacción óptimo del proceso electro-Fenton sobre aguas residuales del camal de Chota.

Tabla 12

Pruebas experimentales para la estimación del tiempo óptimo de reacción del proceso electro-Fenton - Fere

| TIEMPO (Min) | MUESTRA 1 | | MUESTRA 2 | |
|-----------------|------------------|-----------|------------------|------------|
| | DQO FINAL (mg/L) | %REMOCIÓN | DQO FINAL (mg/L) | % REMOCIÓN |
| 0 | 5682,01 | 0,0 | 5682,01 | 0,0 |
| 5 | 4920,62 | 13,4 | 4405,62 | 15,6 |
| 10 | 4079,68 | 28,2 | 3540,96 | 37,7 |
| 15 | 2964,51 | 47,8 | 2306,89 | 59,4 |
| 20 | 2079,62 | 63,4 | 1215,95 | 78,6 |
| 25 | 1338,15 | 76,4 | 905,83 | 84,1 |
| 30 | 1358,74 | 71,0 | 1049,94 | 83,3 |
| 35 | 1318,22 | 76,8 | 905,82 | 84,0 |
| 40 | 1399,91 | 75,4 | 782,30 | 86,2 |
| 45 | 1296,98 | 77,1 | 947,00 | 83,3 |
| 50 | 1380,73 | 75,7 | 720,54 | 87,3 |
| 55 | 1358,74 | 76,1 | 926,41 | 83,7 |
| 60 | 1255,81 | 77,8 | 885,24 | 84,4 |

Nota. Condiciones de operación

8.7 A/ m², pH: 3, Temperatura: ambiente, distancia entre electrodos: 2 cm

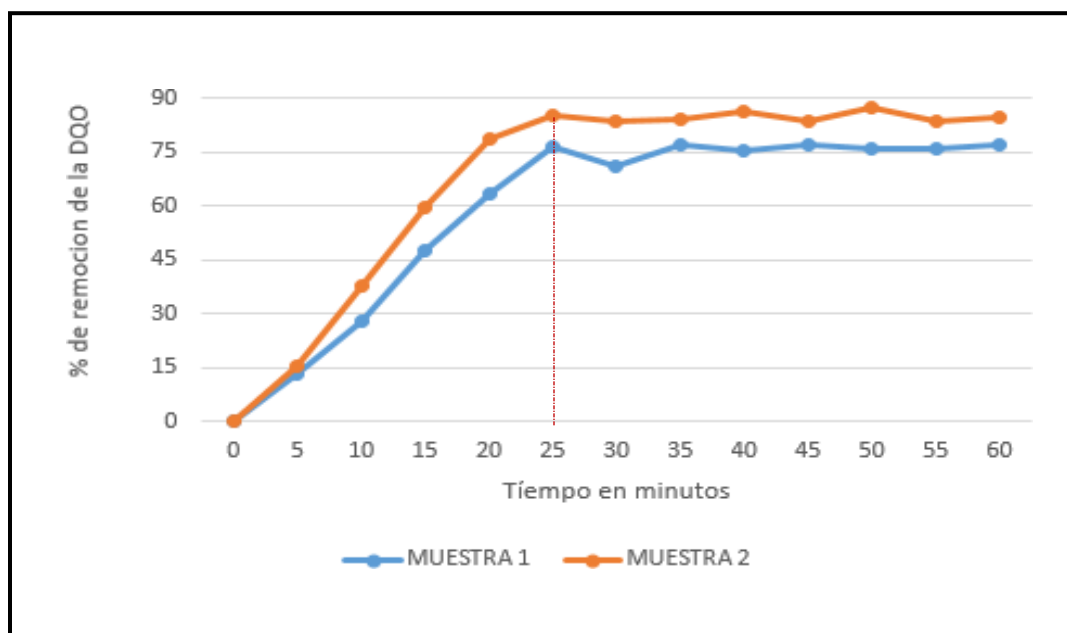
Muestra 1: 700 mg/L FeSO₄.7H₂O, 600 mg/L H₂O₂, 10 V.

Muestra 2: 1400 mg/L FeSO₄.7H₂O, 1000 mg/L H₂O₂, 30 V.

Teniendo como base la tabla 4 se tomó dos muestras, la primera con el nivel bajo y la segunda con el nivel alto de los factores estudiados a un pH ajustado a 3 y una distancia entre electrodos de 2 cm considerado el más adecuado de acuerdo a la revisión bibliográfica. Una vez la reacción puesta en marcha se extraen alícuotas en función al tiempo de acuerdo con la tabla 12, en donde a cada alícuota extraída se le adiciona NaOH 5 M para elevar el pH con el propósito de precipitar el Fe bajo la forma de hidróxidos y detener la reacción. Así también, se agregó 0,5 g de MnO₂ para promover la eliminación de H₂O₂ excedente, se agita y se verifica el cese del burbujeo.

Figura 8

Estimación del tiempo de reacción óptima del proceso electro-Fenton-Fere sobre las aguas residuales del camal de Chota.



En la figura 8 se observa que en los primeros 5 minutos el avance de la reacción es similar para ambas muestras donde la remoción está alrededor del 15 % lo que hace suponer que los radicales OH^* se generan a la misma velocidad a través de los diferentes mecanismos de reacción. Conforme avanza la reacción el sistema alcanza una remoción óptima promedio del 80 % alrededor de los 25 minutos para ambas muestras analizadas, luego de dicho tiempo la remoción de la DQO no sufre cambios sustanciales lo que puede considerarse una remoción constante que tiende a un comportamiento asintótico.

Rahmani et al. (2015) reportó el mismo tiempo de reacción como el más apropiado, Gilpavas et al. (2014) también reportó valores próximos que oscila entre 15 a 30 minutos. Mirshahghassemi et al. (2017) reportaron un tiempo más corto de reacción próximo a los 10 minutos y otros más prolongados que varían entre 40 y 50 minutos (Moussavi y Aqanaghad 2015, Zahra et al. 2015), sin embargo; se debe

considerar que el tiempo de reacción calculado depende exclusivamente de la composición química y características físicas de las aguas residuales del camal, voltaje utilizado, tipo de electrodos y concentración de Fe^{+2} y H_2O_2 .

El ajuste de pH se aproximó a 3 considerado el más adecuado para la reacción óptima del proceso electro-Fenton — Fere de acuerdo a lo manifestado por varios autores para lograr la máxima remoción de la DQO.(Kuleyin et al., 2021, Zahra et al. 2015, Mirshahghassemi et al. 2017). Se consideró una separación entre electrodos de 2 cm ya que de acuerdo a Pushpalatha y Krishna (2017) los electrodos deben situarse entre 1,3 cm a 2,1 cm puesto que distancias más cortas o más largas pueden provocar una caída óhmica a través de la muestra provocando una disminución en la conductividad y voltaje.

3.1.2.- Remoción porcentual de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota.

La tabla 13 reporta la remoción de la DQO de acuerdo a las condiciones indicadas en el plan de experimentación adecuado para la aplicación del diseño de baja composición de Draper — Lin, se tomaron datos de los porcentajes de remoción de la DQO para una muestra inicial seguida de dos repeticiones a fin de minimizar el ruido experimental, haciendo 54 pruebas en total. El cálculo para la remoción de la DQO total es la siguiente:

$$\% \text{ Remoción DQO} = \frac{DQO_{\text{inicial}} - DQO_{\text{remanente}}}{DQO_{\text{inicial}}}$$

Tabla 13

Pruebas experimentales del proceso electro-Fenton-Fere sobre aguas residuales del camal de Chota de acuerdo al diseño de baja composición de Draper – Lin.

| EXP | PLAN DE EXPERIMENTACIÓN | | | | MUESTRA INICIAL DQO = 5682.01 mg/L | | REPLICA 1 DQO = 5682.01 mg/L | | REPLICA 2 DQO = 5682.01 mg/L | |
|-----|-----------------------------|---|------|----------------|---------------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| | FeSO ₄ (mg/L) | H ₂ O ₂ (mg/L) | pH | Voltaje (V) | DQO FINAL (mg/L) | REMOCIÓN % | DQO FINAL (mg/L) | REMOCIÓN % | DQO FINAL (mg/L) | REMOCIÓN % |
| 1 | 1400 | 1000 | 3,5 | 10 | 1255,81 | 77,89 | 1482,26 | 73,91 | 1544,02 | 72,83 |
| 2 | 1400 | 1000 | 2,5 | 10 | 1811,65 | 68,11 | 2038,11 | 64,13 | 1646,96 | 71,01 |
| 3 | 1400 | 600 | 3,5 | 30 | 1296,98 | 77,17 | 1255,81 | 77,89 | 1358,74 | 76,08 |
| 4 | 800 | 1000 | 25 | 30 | 1873,42 | 67,03 | 1646,96 | 71,01 | 1544,02 | 72,83 |
| 5 | 1400 | 600 | 2,5 | 30 | 1255,81 | 77,89 | 1420,50 | 75,00 | 1152,87 | 79,71 |
| 6 | 800 | 600 | 3,5 | 10 | 1770,48 | 68,84 | 1811,65 | 68,12 | 1935,17 | 65,94 |
| 7 | 800 | 1000 | 3,5 | 30 | 844,06 | 85,15 | 1132,28 | 80,07 | 1296,98 | 77,17 |
| 8 | 800 | 600 | 2,5 | 10 | 1811,65 | 68,12 | 1585,19 | 72,10 | 1523,44 | 73,18 |
| 9 | 595,46 | 800 | 3 | 20 | 1708,72 | 69,93 | 1523,44 | 73,19 | 1420,50 | 75,00 |
| 10 | 1604,54 | 800 | 3 | 20 | 679,37 | 88,04 | 452,91 | 92,03 | 741,13 | 86,95 |
| 11 | 1100 | 463,64 | 3 | 20 | 1358,74 | 76,08 | 1544,02 | 72,82 | 1482,26 | 73,91 |
| 12 | 1100 | 1136,36 | 3 | 20 | 617,61 | 89,13 | 391,15 | 93,11 | 555,85 | 90,22 |
| 13 | 1100 | 800 | 2,16 | 20 | 2449,85 | 56,88 | 2264,57 | 60,14 | 1811,65 | 68,11 |
| 14 | 1100 | 800 | 3,84 | 20 | 1255,81 | 77,89 | 1358,74 | 76,08 | 1194,05 | 78,98 |
| 15 | 1100 | 800 | 3 | 3,18 | 3129,22 | 44,93 | 2779,24 | 51,08 | 2655,72 | 53,26 |
| 16 | 1100 | 800 | 3 | 36,81 | 638,19 | 88,76 | 782,31 | 86,23 | 679,37 | 88,04 |
| 17 | 1100 | 800 | 3 | 20 | 514,67 | 90,94 | 555,85 | 90,22 | 391,15 | 93,11 |
| 18 | 1100 | 800 | 3 | 20 | 452,91 | 92,03 | 617,61 | 89,13 | 514,67 | 90,94 |

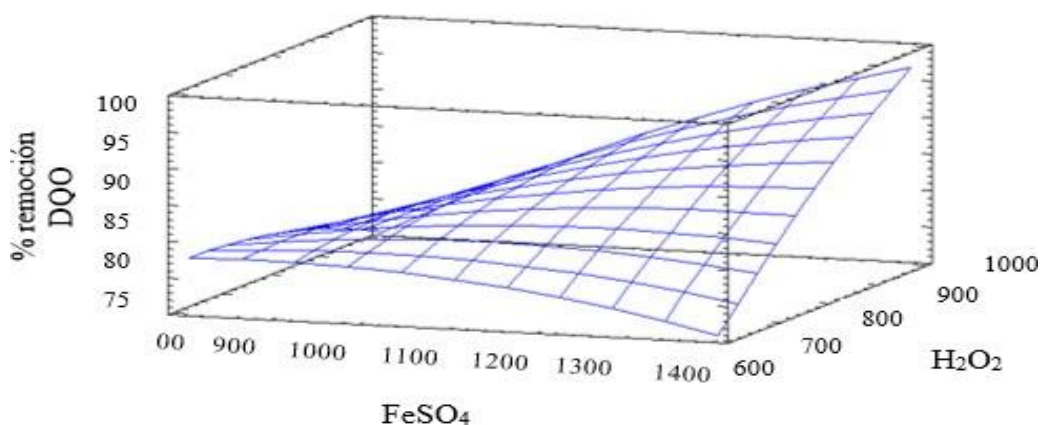
Nota. El cálculo de los porcentajes de remoción de la DQO se midieron a temperatura ambiente, presión atmosférica y distancia entre electrodo a 2 cm

3.1.3.- Optimización de la aplicación del proceso electro-Fenton-Fere en aguas residuales del camal municipal de Chota

Los datos de la tabla 13 se procesaron con el software Statgraphics 5.1 plus mediante el diseño de baja composición de Draper-Lin, se aplicó la MSR obteniéndose la figura 9 para la remoción de la QDO_{total} . Se aprecia una ligera formación punto loma, característico de un comportamiento de segundo orden, pero el punto de optimización para el proceso electro-Fenton-Fere no queda totalmente definido pues tiende a incrementar la remoción de la DQO cuanto más reactivo de Fenton y voltaje se aumente, y ello no puede ser favorable económicamente por lo que fue necesario realizar una prueba de conveniencia mediante un análisis de optimización de respuesta múltiple.

Figura 9

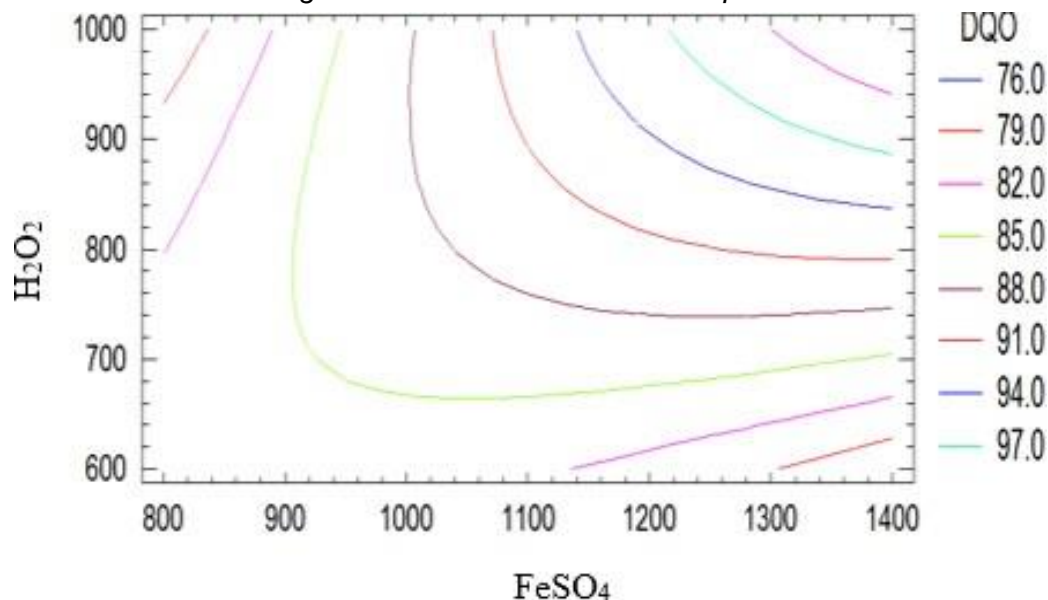
Superficie de respuesta estimada a $pH = 3$ y voltaje = 20 V para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal de Chota.



La figura 10 representa la proyección bidimensional del proceso, donde se puede visualizar las infinitas posibilidades de combinaciones que se pueden dar respecto a los parámetros estudiados del proceso electro-Fenton-Fere. Sin embargo, es observable la imposibilidad de detectar el punto óptimo de aplicación del proceso electro-Fenton-Fere en la región de experimentación por lo que se confirma la necesidad de efectuar la prueba de conveniencia respectivamente.

Figura 10

Contornos de superficie de la respuesta estimada a $pH = 3$ y voltaje = 20 V, para la remoción de DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota.



3.1.4.- Análisis de conveniencia mediante la optimización de respuesta múltiple

El análisis de conveniencia efectuado se muestra en la figura 11, ésta se perfila hacia un comportamiento ligeramente parabólico, lo que da indicios de un punto de optimización para el proceso electro-Fenton-Fere. La figura 12 indica el comportamiento bidimensional de la superficie de optimización de respuesta múltiple, en la cual se puede visualizar que dicho procedimiento ayuda a determinar los factores de estudio que simultáneamente optimiza varias respuestas, es decir; esto hace aumentar al máximo una función de conveniencia para el proceso, siendo la combinación más conveniente para la optimización del proceso electro-Fenton-Fere la mostrada en la tabla 14.

Figura 11

Superficie de respuesta estimada a $pH = 3$ y voltaje = 20 V mediante el análisis de conveniencia de optimización de respuesta múltiple para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal de Chota.

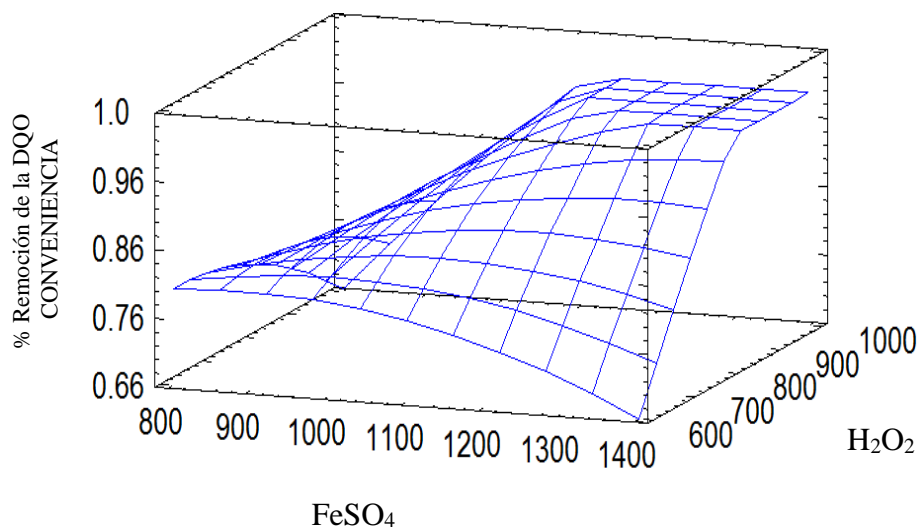


Figura 12

Contornos de superficie de la respuesta estimada a $pH = 3$ y voltaje = 20 V mediante un análisis de optimización de respuesta múltiple para la remoción de DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota

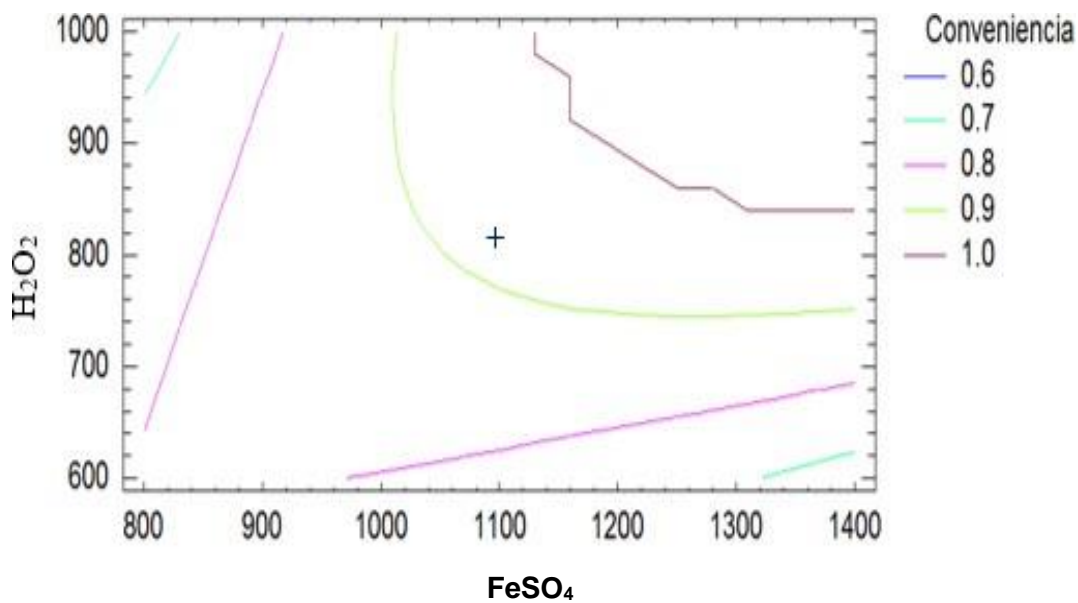


Tabla 14

Optimización de los factores del proceso electro-Fenton-Fere sobre las aguas residuales del canal de Chota mediante el análisis de conveniencia de optimización de respuesta múltiple.

| Factor | Nivel Inferior | Nivel Superior | Óptimo |
|---------------------------------------|----------------|----------------|---------|
| FeSO ₄ (mg/L) | 800 | 1400 | 1098.03 |
| H ₂ O ₂ (mg/L) | 600 | 1000 | 828.41 |
| pH | 2.5 | 3.5 | 3.07 |
| Voltaje (V) | 10 | 30 | 25.8 |
| DQO optimizado ideal = 93.74% | | | |
| DQO optimizado experimental = 89.43 % | | | |

De la tabla 14 se observa que el valor del pH optimizado para el proceso electro-Fenton-Fere aplicado está próximo a 3, valores similares fueron reportados en investigaciones efectuadas por Mirshahghassemi et al. (2017), Davarnejad y Nasiri (2017), Pushpalatha y Krishna (2017), Adimi et al. (2015), Zahra et al. (2015), ello confirma que dicho pH es el ideal para una óptima aplicación del proceso en fase homogénea, cuya condición propicia la generación máxima de radicales OH*, de lo cual se deduce que condiciones de pHs muy bajos o muy altos no son los más apropiados.

Los experimentos 2, 4, 5 y 8 de la tabla 13 indican bajas remociones de DQO, esto porque el pH está por debajo del óptimo a pesar de incrementar el voltaje en el sistema, lo que es muy probable que en tales condiciones de pH se dé la generación de $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$ y $[\text{H}_3\text{O}_2]^{+2}$. A pHs alrededor de 2 el H₂O₂ no puede ser fácilmente descompuesto a OH* por el Fe⁺².y la eficiencia de remoción se ve afectada como se aprecia en el experimento 13. A pHs por encima de 3,5 a 4 el proceso electro-Fenton-Fere empieza a decaer en la efectividad de remoción de la DQO, esto se debe a que el fierro puede iniciar su precipitación reduciendo la concentración del mismo y por ende las cantidades de la remoción de la DQO no es significativa (Pushpalatha y

Krishna 2017, Mirshahghassemi et al., 2017).

En efecto, el voltaje juega un rol importante en el proceso electro-Fenton-Fere, y ello está asociada con el consumo de energía, El amperaje utilizado durante la experimentación fue de 8,7 A/m², si bien el incremento de voltaje a condiciones óptimas incrementa la eficiencia de remoción de DQO, de ella depende la cantidad de energía consumida y por ende la viabilidad del proceso. (Zahra et al., 2015). De la tabla 13 el experimento 15 refleja el efecto de voltaje cuando éste disminuye, la remoción obtenida esta alrededor del 50%, esto puede explicarse por la baja cantidad de electrones proporcionados para regenerar los iones Fe⁺³ a Fe⁺² por ende la generación de OH* disminuye notablemente.

El efecto del ion Fe⁺² se refleja en los experimentos 1, 2, 3 y 5 donde niveles altos de dosificación que suponen abundancia de éste ion, se observa bajas remociones de la DQO, esto se debe a que el pH utilizado se alejan del valor óptimo. A pesar de la regeneración del Fe⁺³ a Fe⁺² en el cátodo los valores de remoción no superan el 78 %. La adición de H₂O₂ en niveles altos supone una alta generación de radicales *OH, pero ello depende del pH, pues a pH muy bajos la catálisis del H₂O₂ puede verse desactivada porque tanto éste como el Fe pueden formar complejos estables (Zahra et al., 2015), el experimento 13 refleja lo expuesto. Por otra parte a pH por encima de 4 el H₂O₂ tiende a descomponerse tal como se observa en el diagrama de Pourbaix (Figura 5).

Los experimentos 10, 12, 16, 17 y 18 indican la mejor performance del proceso, sin embargo; se pueden observar que dosificaciones altas de reactivo de Fenton puede provocar el efecto de barrido de los radicales OH*, incentivar la producción de reacciones secundarias, así como la generación excesiva de lodos que provocaría un problema adicional a gestionar así como también el incremento de costos económicos

adicionales.

De acuerdo a los factores optimizados del proceso electro-Fenton-Fere se alcanzó una remoción máxima experimental de la DQO en un 89.43 % lo que no está muy distante del valor óptimo ideal, ello es explicable por las interacciones propias de las reacción de Fenton en las que se generan reacciones secundarias a pesar de mantener las condiciones óptimas del proceso. Cabe mencionar que la temperatura utilizada durante todo el proceso fue ambiental y presión atmosférica, la separación de los electrodos fue de 2 cm tal como lo recomienda la bibliografía, esto para evitar caídas óhmicas y evitar el corto circuito entre ánodo y cátodo.

3.1.5.- Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota.

Tabla 14

Análisis de varianza para la DQO en aguas residuales del camal municipal de Chota

| Fuente | Σ de cuadrados | G.L | Cuadrado medio | F - ratio | P – valor |
|-----------------------------------|----------------------------|-----|----------------|-----------|-----------|
| X1: FeSO ₄ | 398,537 | 1 | 398,537 | 30,54 | 0,0000 |
| X2: H ₂ O ₂ | 420,855 | 1 | 410,855 | 31,49 | 0,0000 |
| X3: pH | 359,504 | 1 | 359,504 | 27,55 | 0,0000 |
| X4: Voltaje | 2156,88 | 1 | 2156,88 | 165,31 | 0,0000 |
| X1X1 | 188,629 | 1 | 188,629 | 14,46 | 0,0005 |
| X1X2 | 674,897 | 1 | 674,897 | 51,72 | 0,0000 |
| X1X3 | 0,0504 | 1 | 0,0504 | 0,00 | 0,9508 |
| X1X4 | 236,21 | 1 | 236,21 | 18,10 | 0,0001 |
| X2X2 | 103,806 | 1 | 103,806 | 7,96 | 0,0077 |
| X2X3 | 175,284 | 1 | 175,284 | 13,43 | 0,0008 |
| X2X4 | 153,294 | 1 | 153,294 | 11,75 | 0,0015 |
| X3X3 | 1384,33 | 1 | 1384,33 | 106,10 | 0,0000 |
| X3X4 | 15,328 | 1 | 15,328 | 1,17 | 0,2854 |
| X4X4 | 1538,98 | 1 | 1538,98 | 117,95 | 0,0000 |
| Bloques | 17,555 | 2 | 8,777 | 0,67 | 0,5165 |
| Error total | 482,771 | 37 | 13,0479 | | |
| Total (Corr.) | 6610,25 | 53 | | | |
| R –cuadrado: | 92,69 % | | | | |
| R – cuadrado: | 90,07 % (ajuste para G.L.) | | | | |
| Error Estándar: | 3,612 | | | | |
| Error Absoluto de la media: | 2,362 | | | | |
| Estadístico Durbin – Watson: | 2,267 (P 0,1064) | | | | |

La ecuación matemática ajustada al modelo es (14):

$$\begin{aligned} \text{DQO} = & -37,6738 - 0,0687681(X_1) - 0,178191(X_2) + 131,771(X_3) - \\ & 68,4849 \cdot 10^{-3}(X_4) - 25,6903 \cdot 10^{-6}(X_1)^2 + 13,7325 \cdot 10^{-5}(X_1 \cdot X_2) - \\ & 30,5556 \cdot 10^{-5}(X_1 \cdot X_3) + 16,2483 \cdot 10^{-4}(X_1 \cdot X_4) - 42,8803 \cdot 10^{-6}(X_2)^2 + \\ & 27,025 \cdot 10^{-3}(X_2 \cdot X_3) + 19,6343 \cdot 10^{-4}(X_2 \cdot X_4) - 25,0545(X_3)^2 + \\ & 15,9833 \cdot 10^{-2}(X_3 \cdot X_4) - 66,0427 \cdot 10^{-3}(X_4)^2 \end{aligned}$$

Donde:

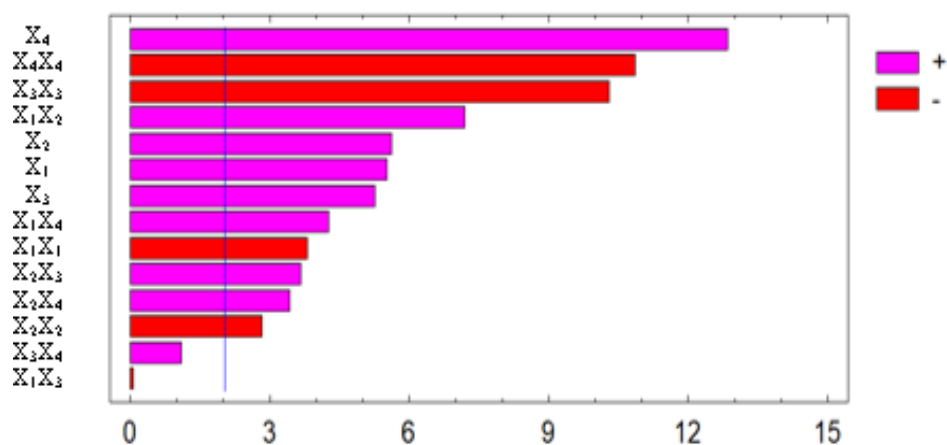
$$X_1 = \text{FeSO}_4 \quad X_2 = \text{H}_2\text{O}_2 \quad X_3 = \text{pH} \quad X_4 = \text{Voltaje}$$

En la tabla 14 se pueden verificar 12 efectos que son estadísticamente significativos ($P < 0,05$) a un 95% de confianza. El valor de 90% del estadístico R cuadrado ajustado para los grados de libertad postula la gran dependencia en la remoción de DQO por las condiciones de voltaje, seguida de las cantidades de H_2O_2 y FeSO_4 adicionado, pH, interacciones y efectos cuadráticos como se muestra en la figura 13, donde el efecto que sobrepase la línea vertical remarcada expresa que es estadísticamente significativo. El modelo ajustado explica un 92,69 % de la variabilidad de la DQO.

En la figura 14 se puede visualizar dos zonas formada por la recta de pendiente positiva, la zona debajo de la línea recta implica a los factores que tienen coeficientes con valores negativos y la zona superior los factores que tienen coeficientes con valores positivos y en consecuencia son significativos. Los puntos situados sobre la recta indican los factores e interacciones que no son significativos. Cuanto más se alejan los puntos de la recta mayor será su aporte ya sea positiva o negativamente durante el tratamiento cuando sus coeficientes sean manipulados. En consecuencia se puede inferir que los parámetros analizados tienen que ser los más adecuados para que el proceso sea viable.

Figura 13

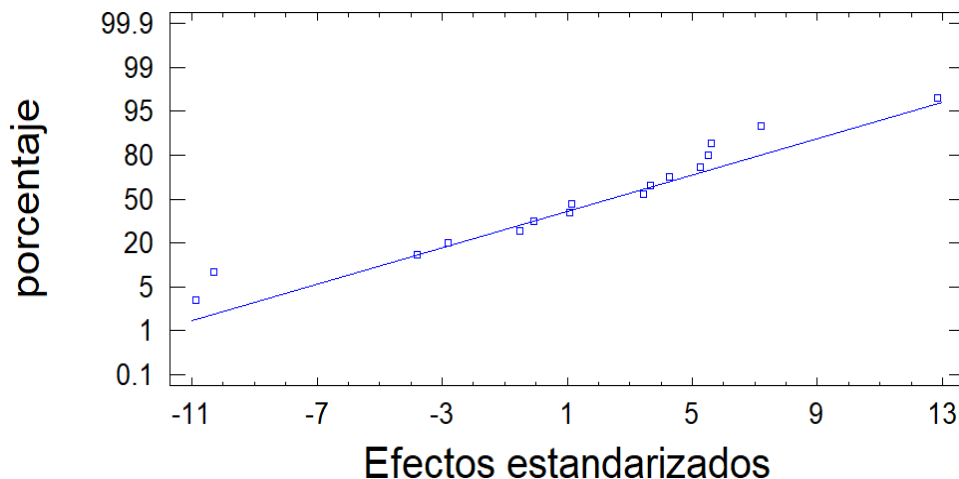
Efectos de las variables para la remoción de DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota



Efectos estandarizados

Figura 14

Probabilidad normal para la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota.



De la figura 14 y la tabla 14 se puede establecer que los factores del proceso electro-Fenton-Fere estudiados son significativos, el valor positivo del coeficiente del factor pH en el modelo matemático propuesto indica la influencia que tiene el proceso de remoción de la DQO. Los coeficientes de los demás factores estudiados representan valores negativos lo que supone que si estos actuaran independiente

en el proceso no tendrían efectos importantes sobre la remoción de la DQO. Sin embargo; las interacciones generadas entre los factores presentan efectos significativos en especial las generadas por efecto de la adición de voltaje.

Los valores del error estándar y error absoluto de la media son 3,612 y 2,362 respectivamente, lo que explica que los datos no están muy dispersos y que el error de pronóstico puede ser considerado aceptable. Por otro lado atendiendo al valor del estadístico Durbin-Watson cuyo P-valor está por encima de 0,05 se puede deducir que no hay probabilidad de ocurrencia respecto a la correlación de serie en los residuos. En efecto, se puede establecer que el factor pH adquiere un lugar relevante para alcanzar la máxima performance del proceso electro-Fenton-Fere seguido por el voltaje, reactivos de Fenton e interacciones.

3.1.6.- *Cinética de remoción de DQO en aguas residuales a condiciones óptimas del proceso Electro-Fenton-Fere.*

Tabla 15

Comportamiento Cinético de la reacción Electro-Fenton-Fere para la remoción de la DQO en aguas residuales del camal de Chota

| Tiempo (min) | DQO _{FINAL} (mg/L) | % Remoción |
|-----------------|---------------------------------|---------------|
| 0 | 5682,01 | 0 |
| 5 | 4817,66 | 15,2 |
| 10 | 3664,48 | 35,5 |
| 15 | 2449,85 | 56,8 |
| 20 | 967,59 | 82,9 |
| 25 | 602,29 | 89,4 |

Nota. Condiciones de operación

FeSO₄ = 1098,03 mg/L H₂O₂ = 828,41 mg/L pH = 3,07 voltaje = 25,8 V

Presión: Atmosférica Temperatura: Ambiente

• **Cinética de orden cero**

Queda gobernada por la ecuación 15, que relaciona el diferencial de la concentración con un diferencial de tiempo dando como resultado un valor constante de pendiente negativa. Los valores de la tabla 15 son alimentados y

analizados mediante el software Statgraphics 5.1 plus, la tabla 16 muestra el análisis de regresión practicado para determinar el comportamiento cinético de la remoción de la DQO.

$$\frac{[DQO]}{dt} = -k \tag{15}$$

En su forma integrada se obtiene

$$[DQO]_t = -kt + \text{constante} \tag{16}$$

Tabla 16

Análisis de regresión múltiple para la cinética de orden cero de la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante el proceso electro-Fenton-Fere

proceso electro-Fenton pero

| Variable dependiente: [DQO] | | | | | |
|--|-------------------|----------------|----------------|------------|---------|
| Parámetro | Estimación | Error estándar | Estadístico T | P - valor | |
| Constante | 5781.14 | 177.345 | 32.5983 | 0,00 | |
| Tiempo | -221.757 | 11.715 | -18.9293 | 0,00 | |
| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | |
| Fuente | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado medio | Cociente-F | P-valor |
| Modelo | 2.1514E10 | 1 | 2.1514E7 | 358.32 | 0,0000 |
| Residuo | 240172 | 4 | 60043.1 | | |
| Total (Corr.) | 2.17547E7 | 5 | | | |
| R - cuadrado: 98.896% | | | | | |
| R - cuadrado (ajustado para g.l) : 98.62 | | | | | |
| %Error estándar de est. : 245.037 | | | | | |
| Error absoluto medio : 160.829 | | | | | |

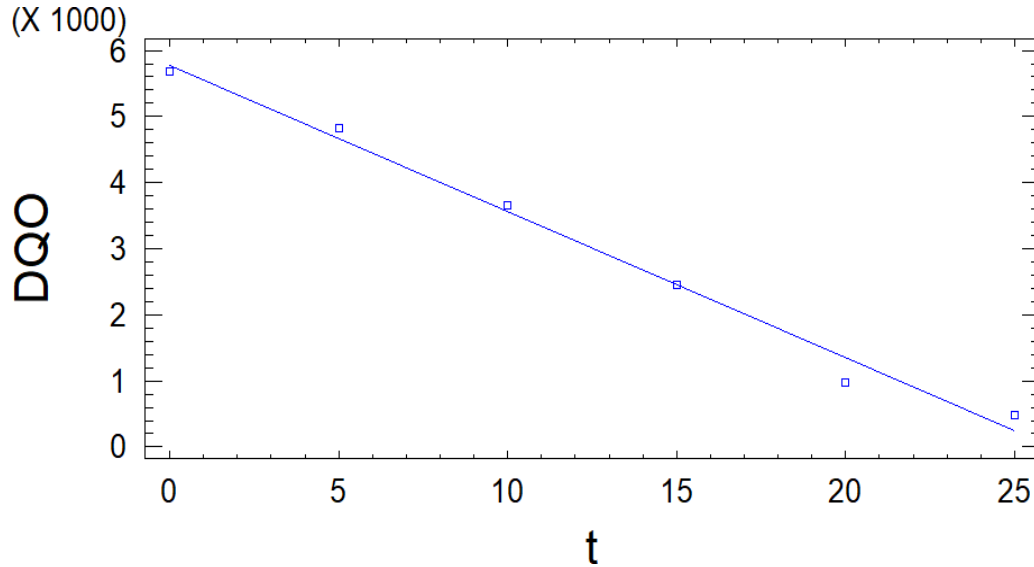
La ecuación matemática obtenida que explica un comportamiento cinético de orden cero es:

$[DQO] = 5781.14 - 221.757 * t$

(1)

Figura 15

[DQO] vs t (min) para una cinética de orden cero de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante la aplicación del proceso Electro-Fenton-Fere.



- **Cinética de primer orden**

Está gobernada por la ecuación 18:

$$\frac{d[DQO]}{dt} = -k[DQO]_0 \quad (18)$$

Que luego de ser integrada, ordenada y linealizada se obtiene:

$$[DQO_t] = -kt + constante \quad (19)$$

Los valores de la tabla 15 son analizados con el software Statgraphics 5.1 plus, la tabla 17 muestra el análisis de regresión practicado para determinar el comportamiento cinético respectivo.

Tabla 17

Análisis de regresión múltiple para la cinética de primer orden de la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante el proceso electro-Fenton.Fere

| Parámetro | Estimación | Error estándar | Estadístico T | P - valor |
|-----------|------------|----------------|---------------|-----------|
| Constante | 8.95519 | 0,221363 | 40.4549 | 0,0000 |
| T | -0,100829 | 0,0146227 | -6.89533 | 0,0023 |

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | |
|----------------------|-------------------|-----|----------------|--------------|---------|
| Fuente | Suma de cuadrados | G L | Cuadrado medio | Cociente - F | P-valor |
| Modelo | 4.4478 | 1 | 4.4478 | 47.55 | 0,0023 |
| Residuo | 0,374192 | 4 | 0,093548 | | |
| Total (Corr.) | 4.82199 | 5 | | | |

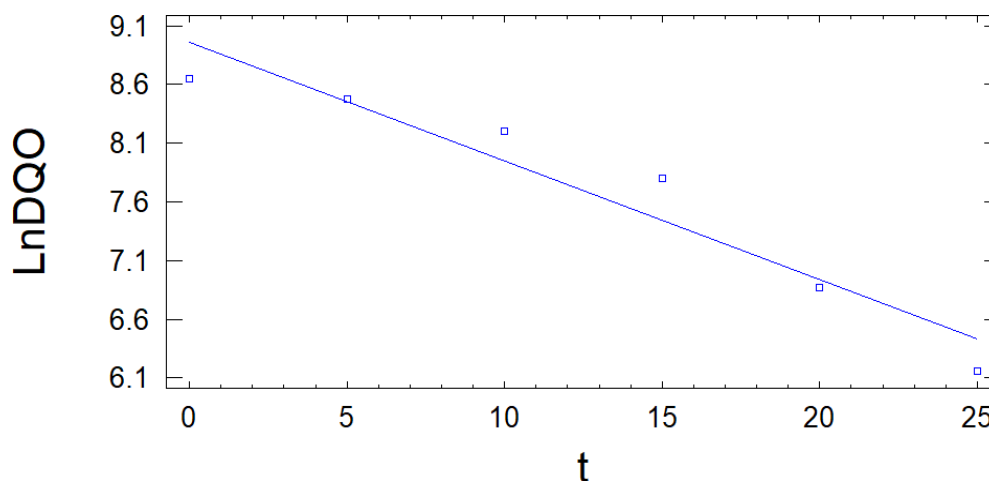
| Variable dependiente: Ln [DQO] | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|
| R - cuadrado: 92.2399 % | | | | | |
| R - cuadrado (ajustado para g.l) : 90.2998 % | | | | | |
| Error estándar de est. : 0,305856 | | | | | |
| Error absoluto medio: 0,216429 | | | | | |

La ecuación matemática obtenida para un comportamiento cinético estudiado es:

$$\text{Ln}[DQO] = 8.95519 - 0.100829 * t \quad (20)$$

Figura 16

Ln[DQO] vs t (min) para la cinética de primer orden de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante la aplicación del proceso Electro-Fenton-Fere



➤ **Cinética de segundo orden**

Tabla 18

Análisis de regresión múltiple para la cinética de segundo orden de la remoción de la DQO de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante el proceso Electro-Fenton-Fere

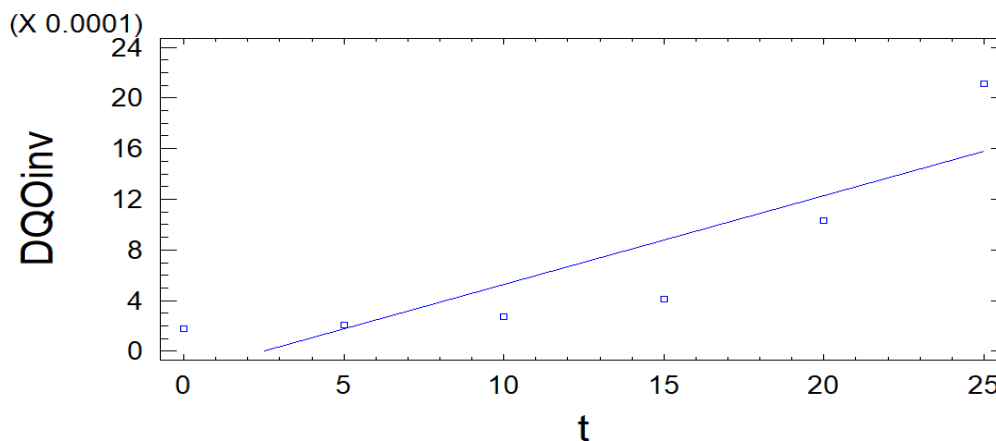
| Variable dependiente: [DQO] inv | | | | |
|---------------------------------|------------|----------------|---------------|-----------|
| Parámetro | Estimación | Error estándar | Estadístico T | P – valor |
| Constante | -0.0001761 | 0.00003086 | -0.5705 | 0.5998 |
| Tiempo | 0.0000726 | 0.00002039 | 3.44601 | 0.0261 |

| ANÁLISIS DE VARIANZA | | | | | |
|----------------------|-------------------|----|----------------|--------------|-----------|
| Fuente | Suma de cuadrados | GL | Cuadrado medio | Cociente - F | P - valor |
| Modelo | 2.16E-6 | 1 | 2.16E-6 | 11.87 | 0,0261 |
| Residuo | 7.276E-7 | 4 | 1,819*10-7 | | |
| Total (Corr.) | 2.887E-6 | 5 | | | |

R - cuadrado: 74.80 %
R - cuadrado (ajustado para g.l) : 68.50 %
Error estándar de est. : 0,0004265
Error absoluto medio : 0,0003052

Figura 17

1/[DQO] vs t (min) para la cinética de segundo orden de las aguas residuales del camal municipal de Chota mediante la aplicación del proceso Electro-Fenton-Fere



La ecuación matemática obtenida para un comportamiento cinético estudiado es:

$$[DQO]_{inv} = 0,000176114 - 0,000070267 \cdot t \quad (21)$$

A partir de los valores de la tabla 15 se estudiaron los comportamientos cinéticos de cero, primer y segundo orden en función de la DQO removida. La regresión múltiple aplicados señalan un R^2 ajustado muy cercanos entre sí para la reacción de orden cero ($R^2 = 98,896 \%$) y primer orden ($R^2 = 98,62 \%$), para la reacción de segundo orden ($R^2 = 74,80 \%$) se observa una caída apreciable del valor de R^2 , ello se visualiza en las tablas 16, 17 y 18, los P - valores para el modelo ajustado son inferiores a 0,01 para la cinética de cero y primer orden, es decir: hay una relación significativa entre las variables para un $\alpha=99 \%$, para la cinética de segundo el valor de P - valor para el modelo ajustado explica que hay una relación significativa entre las variables para un $\alpha=95\%$.

Las figuras 15, 16 y 17 esbozan el comportamiento cinético para la remoción de la DQO, a partir de sus respectivas correlaciones linealizadas se observan que las cinéticas de orden cero y primer orden reúnen las condiciones de elegibilidad de acuerdo al valor de ajuste de la recta obtenida a fin de explicar el comportamiento de la reacción, no siendo así para la correlación de linealización de la cinética de segundo orden que se aleja del valor óptimo de $R^2 = 1$.

Atendiendo al sustento teórico correspondiente y al estadístico de regresión de mayor ajuste, el modelo cinético que explica la velocidad de remoción de la DQO se acerca a un modelo cinético de orden cero, pero afirmar que tales reacciones homogéneas sean necesariamente de orden cero resulta difícil de asumir, puesto que es posible que en la alícuota exista la concentración de contaminantes relativamente alta lo que dificulta visualizar la funcionalidad dependiente entre velocidad y concentración, así; que es más factible asumir que el comportamiento sea de un orden cero aparente o pseudo primer orden (Smith 1991).

A de tenerse consideración que las aguas residuales de camales son una mezcla compleja de contaminantes y ello no favorece para evaluar con claridad la cinética, es por ello recomendable efectuar estudios parciales de algunos de los contaminantes (Nichela, 2012), esto permitiría tener un indicativo promedio de las concentraciones sobre la velocidad de reacción, pero lo mencionado no se ha estudiado en el presente trabajo. En consecuencia, es probable que el comportamiento cinético de remoción de DQO en las aguas residuales del camal municipal de Chota sea de pseudo primer mediante dos mecanismos: reacción radicalaria y la abstracción de hidrógeno (ecuaciones 7 y 10).

3.1.7.- Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales del camal municipal de Chota después de la optimización del proceso electro- Fenton-Fere.

Comparando los valores de la tabla 19 con la caracterización inicial (Tabla 2) se puede observar una mejoría sustancial en casi todos los parámetros estudiados verificándose una reducción del alrededor del 87 % en la dureza total, 88,7 % en alcalinidad total, 98,7 % en sólidos totales, 99 % en la turbidez. El proceso de acidificación de las aguas residuales para lograr pH óptimo favoreció la disminución de la alcalinidad y dureza total, el solo cambio de pH afecta los iones bicarbonato minimizando el efecto tampón y la fuerza iónica de las aguas residuales, propiciando de esta manera la floculación y precipitación de la sustancias coloidales mejorando a la vez la turbidez ya que arrastra a su paso material en suspensión (Fontmorin y Sillanpaa, 2015).

Tabla 19

Composición Fisicoquímica final de las aguas residuales del camal municipal de Chota

| Parámetro | Medido en | valor |
|------------------------|-----------------------|--------|
| DBO ₅ | ppm O ₂ | 307,16 |
| DQO | ppm O ₂ | 602,29 |
| Dureza total | ppm CaCO ₃ | 188 |
| Dureza cálcica | ppm CaCO ₃ | 108 |
| Dureza magnésica | ppm CaCO ₃ | 80 |
| Alcalinidad total | ppm CaCO ₃ | 144 |
| Potencial de Hidrogeno | pH | 7,3 |
| Conductividad | μS/cm | 2210 |
| Resistividad | MΩ.cm | 0,0005 |
| Sólidos Totales | Ppm | 104 |
| Sólidos sedimentables | mL/L | 2 |
| Cloruros | g/L | 2,05 |
| OD | ppm O ₂ | 7,8 |
| Turbidez | FNU | 1,2 |
| ORP | mV | 56 |
| Temperatura | °C | 19,4 |

Tabla 20

Índice de Biodegradabilidad (IB) de las aguas residuales del camal municipal de Chota antes y después del tratamiento con el proceso electro-Fenton

| Muestra | Condición | IB |
|----------------------------------|------------------------|-------|
| Agua residual del camal de Chota | Antes del tratamiento | 0,394 |
| | Después de tratamiento | 0,509 |

Otro parámetro importante es la conductividad, que se observa incrementada en un 40 %, si bien el efecto de la capacidad tampón del bicarbonato también es apreciable cuando se mide la conductividad de las aguas residuales, este debería descender a medida que baja el valor del pH llegando a su valor mínimo. Sin embargo, para alcanzar el pH óptimo calculado para el proceso electro-Fenton-Fere se requiere la adición de ácido a las aguas que a pesar de su neutralización quedan remanentes que propician el incremento en la conductividad. De igual manera la adición de sales ferrosas a pesar de su remoción como lodos después de la neutralización, sus remanentes contribuyen al incremento de la conductividad.

El OD incrementó en un 90 %, ello supone que las aguas residuales sufrieron cambios en su composición contaminante, esto tiene concordancia con la remoción de la DQO en un 89 %, lo que se pone de manifiesto en la medición de la ORP que cambia de un entorno reductor contaminante (valores negativos) a un medio oxidante (valores positivos). Por otro lado el IB mejoró con la aplicación del proceso electro-Fenton- Fere (Tabla 20). De las tablas 2 y 19 se obtienen los valores de IB que al comparar con los valores teóricos referenciales (Tabla 5) se observa la mejora de los componentes contaminantes de las aguas residuales ya que éstas pasan de poseer un contenido orgánico con características de difícil degradabilidad a una agua residual con mejores condiciones de degradación.

3.1.8.- PRUEBA DE HIPÓTESIS

- Prueba de Hipótesis para la media en aguas residuales del camal municipal de Chota

Tabla 21

Análisis de la varianza para la DQO en las aguas residuales el camal de Chota

| Fuente | Suma de cuadrados | G.L | Cuadrado medio | F - ratio | P – valor |
|----------------------------------|-------------------|-----|----------------|-----------|-----------|
| A: FeSO ₄ | 398,537 | 1 | 398,537 | 30,54 | 0,0000 |
| B: H ₂ O ₂ | 410,855 | 1 | 410,855 | 31,49 | 0,0000 |
| C: pH | 359,504 | 1 | 359,504 | 27,55 | 0,0000 |
| D: Voltaje | 2156,88 | 1 | 2156,88 | 165,31 | 0,0000 |
| AA | 188,629 | 1 | 188,629 | 14,46 | 0,0005 |
| AB | 674,897 | 1 | 674,897 | 51,72 | 0,0000 |
| AC | 0,0504167 | 1 | 0,05042 | 0,00 | 0,9508 |
| AD | 236,21 | 1 | 236,210 | 18,10 | 0,0001 |
| BB | 103,806 | 1 | 103,806 | 7,96 | 0,0077 |
| BC | 175,284 | 1 | 175,284 | 13,43 | 0,0008 |
| BD | 153,294 | 1 | 153,294 | 11,75 | 0,0015 |
| CC | 1384,33 | 1 | 1384,33 | 106,10 | 0,0000 |
| CD | 15,328 | 1 | 15,3280 | 1,17 | 0,2854 |
| DD | 1538,98 | 1 | 1538,98 | 117,95 | 0,0000 |
| Bloques | 17,5551 | 2 | 17,5551 | 0,67 | 0,5165 |

De la tabla 21 se aprecia que son 12 y 4 los grados de libertad, así; el F_{α} se halla

de las tablas de valores para la distribución de F de Fisher al 5%, Luego:

$$F_{0.05,12,4} = 5,91 \quad \text{por tanto} \quad F_{\text{tabla}} = 5,91$$

➤ Factor A (FeSO_4)

$H_0: \mu = 0$ No existe remoción de DQO por efecto del FeSO_4 .

$H_a: \mu \neq 0$ Si existe remoción de DQO por efecto del FeSO_4 De la tabla 21

se observa que $F_0 = 30,54$ donde: $F_0 > F_{\text{tabla}}$

Se rechaza H_0 y se acepta H_a .

➤ Factor B (H_2O_2)

$H_0: \mu = 0$ No existe remoción de DQO por efecto del H_2O_2 .

$H_a: \mu \neq 0$ Si existe remoción de DQO por efecto del H_2O_2

De la tabla 21 se observa que $F_0 = 31,49$ donde: F_0

$> F_{\text{tabla}}$

Se rechaza H_0 y se acepta H_a

➤ Factor C (pH)

$H_0: \mu = 0$ No existe remoción de DQO por efecto del pH.

$H_a: \mu \neq 0$ Si existe remoción de DQO por efecto del pH. De la tabla 21

se observa que $F_0 = 27.55$ donde: $F_0 > F_{\text{tabla}}$

Se rechaza H_0 y se acepta H_a .

➤ Factor D (Voltaje)

$H_0: \mu = 0$ No existe remoción de DQO por efecto del

voltaje

$H_a: \mu \neq 0$ Si existe remoción de DQO por efecto del voltaje

De la tabla 21 se observa que $F_0 = 165.31$ donde: $F_0 > F_{tabla}$

Se rechaza H_0 y se acepta H_a .

De lo expuesto se demuestra que para los 4 factores estudiados se verifica que sí tienen efecto en la remoción de la DQO

3.1.9.- Prueba de rangos múltiples para las aguas residuales del camal municipal de Chota.

Tabla 22

Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de DQO por $FeSO_4$ en las aguas residuales del camal municipal de Chota

| | | | | | |
|--|-------------------|----------------------|-------------------|-------------|----------|
| Variable dependiente: DQO | | | | | |
| Factor: FeSO ₄ | | N° observaciones: 54 | | Niveles : 3 | |
| ANOVA para DQO según FeSO ₄ | | | | | |
| ANÁLISIS DE LA VARIANZA | | | | | |
| Fuente | Suma de cuadrados | G.L. | Cuadrado medio | Cociente F | P- valor |
| Entre Grupos | 817,038 | 4 | 204,26 | 1,73 | 0,159 |
| Intra grupos | 5793,21 | 49 | 118,229 | | |
| Total (corr.) | 6610,25 | 53 | | | |
| CONTRASTE MULTIPLE DE RANGO PARA DQO SEGUN FESO ₄ | | | | | |
| Método : 95 % LSD | | | | | |
| FeSO ₄ (mg/L) | Frecuencia | Media | Grupos Homogéneos | | |
| 800 | 12 | 72,4633 | X | | |
| 595,462 | 3 | 72,7067 | XX | | |
| 1400 | 12 | 74,3017 | X | | |
| 1100 | 24 | 78,0008 | XX | | |
| 1604,54 | 3 | 89,0067 | X | | |
| Contraste | Diferencias | | +/- Límites | | |
| 595,462 - 800 | 0,243333 | | 14,1046 | | |
| 595,462 - 1100 | -5,29417 | | 13,3808 | | |
| 595,462 - 1400 | -1,595 | | 14,1046 | | |
| 595,462 - 1604,54 | -16,3 | | 17,8411 | | |
| 800 - 1100 | -5,5375 | | 7,72542 | | |
| 800 - 1400 | -1,8383 | | 8,92054 | | |
| 800 - 1604,54 | *-16,5433 | | 14,1046 | | |
| 1100 - 1400 | 3,69917 | | 7,72542 | | |
| 1100 - 1604,54 | -11,0058 | | 13,3808 | | |
| 1400 - 1604,54 | *-14,705 | | 14,1046 | | |

* Indica una diferencia significativa

Figura 18

Gráfico de medias y 95 % de confianza para la remoción de DQO por FeSO_4 en aguas residuales del camal municipal de Chota

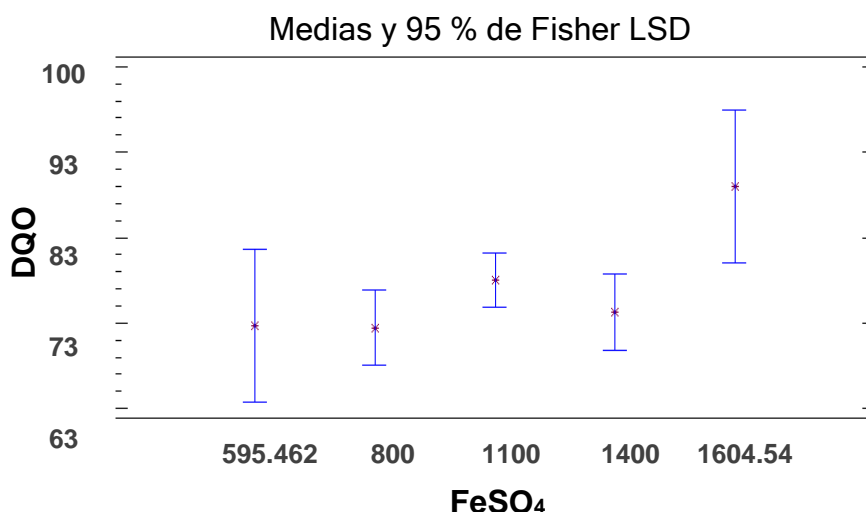


Tabla 23

Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de DQO por H_2O_2 en las aguas Residuales del camal municipal de Chota.

| | | | | | |
|--|-------------------|----------------------|-------------------|------------|-----------|
| Variable dependiente: DQO | | | | | |
| Factor: H ₂ O ₂ | | N° observaciones: 54 | | Niveles: 3 | |
| ANOVA para DQO según H ₂ O ₂ | | | | | |
| ANÁLISIS DE LA VARIANZA | | | | | |
| Fuente | Suma de cuadrados | G.L | Cuadrado medio | Cociente F | P - valor |
| Entre Grupos | 888,368 | 4 | 222,092 | 1,90 | 0,125 |
| Intra grupos | 5721,88 | 49 | 116,773 | | |
| Total (corr.) | 6610,25 | 53 | | | |
| CONTRASTE MÚLTIPLE DE RANGO PARA DQO SEGÚN H ₂ O ₂ | | | | | |
| Método : 95 % LSD | | | | | |
| H ₂ O ₂ (mg/L) | Frecuencia | Media | Grupos Homogéneos | | |
| 600 | 12 | 73,3367 | X | | |
| 1000 | 12 | 73,4283 | X | | |
| 463,641 | 3 | 74,27 | XX | | |
| 800 | 24 | 77,5787 | XX | | |
| 1136,36 | 3 | 90,82 | X | | |
| Contraste | Diferencias | | +/- Límites | | |
| 463,641 - 600 | 0,93333 | | 14,0175 | | |
| 463,641 - 800 | -3,30875 | | 13,2982 | | |
| 463,641 - 1000 | 0,841667 | | 14,0175 | | |
| 463,641 - 1136,36 | -16,55 | | 17,7309 | | |
| 600 - 800 | -4,24208 | | 7,67771 | | |
| 600 - 1000 | -0,091667 | | 8,86545 | | |
| 600 - 1136,36 | *-17,4833 | | 14,0175 | | |
| 800 - 1000 | 4,15042 | | 7,67771 | | |
| 800 - 1136,36 | -13,2412 | | 13,2982 | | |
| 1000 - 1136,36 | *-17,3917 | | 14,0175 | | |

* Indica una diferencia significativa

Figura 19

Gráfico de medias y 95 % de confianza para la remoción de DQO por H_2O_2 en las aguas residuales del camal municipal de Chota

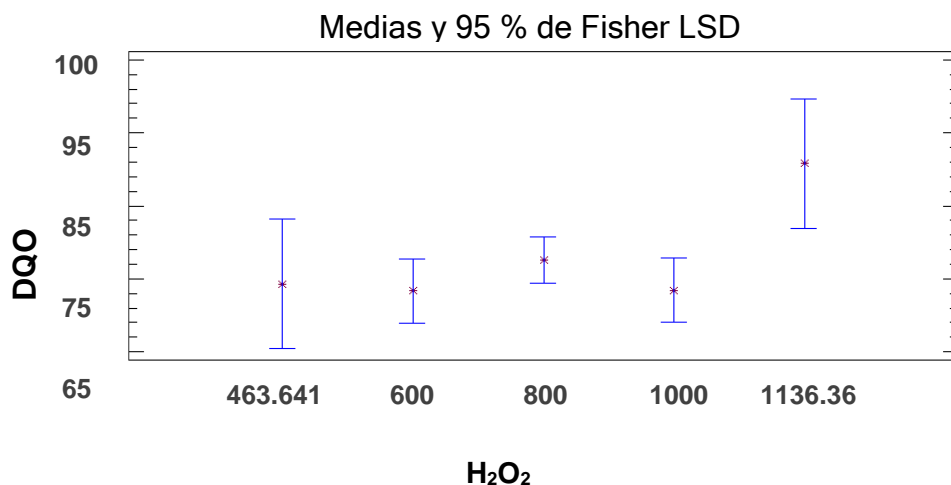


Tabla 24

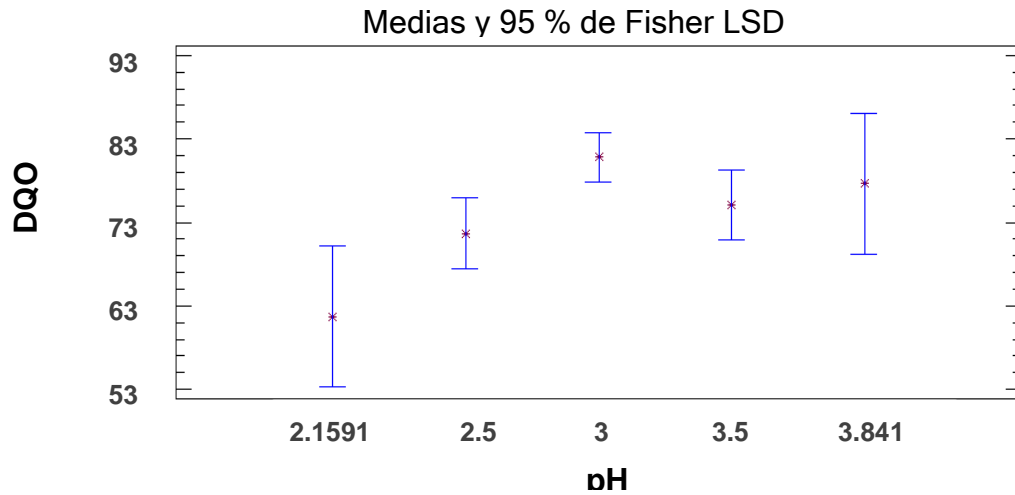
Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de DQO por pH en aguas residuales del camal Chota

| | | | | | |
|---|-------------|----------------------|-------------------|------------|----------|
| Variable dependiente: DQO | | | | | |
| Factor: pH | | N° observaciones: 54 | | Niveles:3 | |
| ANOVA para DQO según pH | | | | | |
| ANÁLISIS DE LA VARIANZA | | | | | |
| Fuente | Suma de | G.L | Cuadrado | Cociente F | P -valor |
| | cuadrados | | medio | | |
| Entre Grupos | 1403,05 | 4 | 350,762 | 3,30 | 0,0179 |
| Intra grupos | 5207,2 | 49 | 106,269 | | |
| Total (corr.) | 6610,25 | 53 | | | |
| CONTRASTE MULTIPLE DE RANGO PARA DQO SEGÚN PH | | | | | |
| Método : 95 % LSD | | | | | |
| pH | Frecuencia | Media | Grupos Homogéneos | | |
| 21591 | 3 | 61,71 | X | | |
| 2,5 | 12 | 71,676 | XX | | |
| 3,5 | 12 | 75,088 | XX | | |
| 3,841 | 3 | 77,65 | XXX | | |
| 3 | 24 | 80,795 | X | | |
| Contraste | Diferencias | | Límites | | |
| 2,1591 - 2,5 | -9,96667 | | 13,3722 | | |
| 2,1591 - 3,0 | *-19,085 | | 12,686 | | |
| 2,1591 - 3,5 | *-13,3783 | | 13,3722 | | |
| 2,1591 - 3,841 | -15,94 | | 16,9147 | | |
| 2,5 - 3 | *-9,11833 | | 7,32427 | | |
| 2,5 - 3,5 | -3,41167 | | 8,45734 | | |
| 2,5 - 3,841 | -5,97333 | | 13,3722 | | |
| 3 - 3,5 | 5,70667 | | 7,32427 | | |
| 3 - 3,841 | 3,145 | | 12,686 | | |
| 3,5 - 3,841 | -2,56167 | | 13,3722 | | |

* Indica una diferencia significativa

Figura 20

Gráfico de medias y 95 % de confianza para la remoción de DQO por pH en aguas residuales del camal municipal de Chota

**Tabla 25**

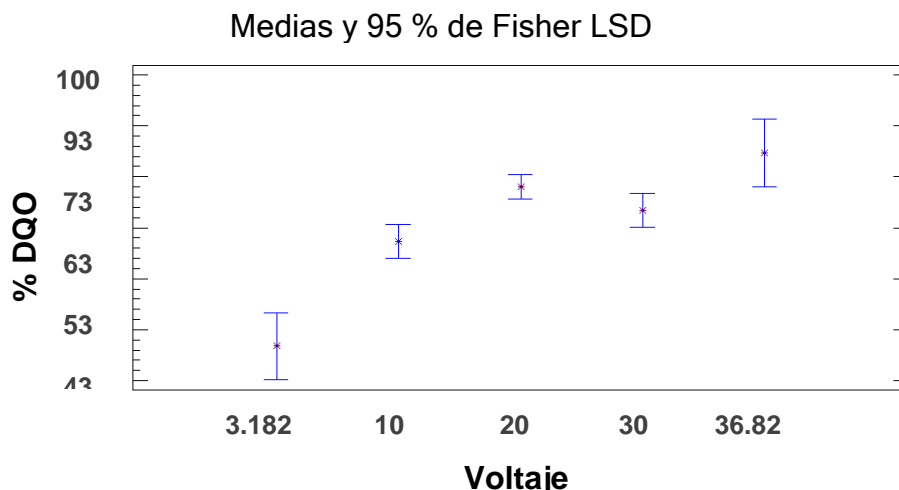
Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de DQO por voltaje en Aguas residuales del camal de Chota

| | | | | | |
|--|-------------|----------------------|-------------------|------------|--------|
| Variable dependiente: DQO | | | | | |
| Factor: Voltaje (V) | | N° observaciones: 54 | | Niveles: 3 | |
| ANOVA para DQO según Voltaje | | | | | |
| ANÁLISIS DE LA VARIANZA | | | | | |
| Fuente | Suma de | G.L | Cuadrado | Cociente F | P - |
| | cuadrados | . | medio | | valor |
| Entre Grupos | 3465,37 | 4 | 866,343 | 13,50 | 0,0000 |
| Intra grupos | 3144,88 | 49 | 64,1812 | | |
| Total (corr.) | 6610,25 | 53 | | | |
| CONTRASTE MÚLTIPLE DE RANGO PARA DQO SEGÚN VOLTAJE | | | | | |
| Método : 95 % LSD | | | | | |
| Voltaje | Frecuencia | Media | Grupos Homogéneos | | |
| 3,182 | 3 | 49,756 | X | | |
| 10 | 12 | 70,348 | X | | |
| 30 | 12 | 76,416 | XX | | |
| 20 | 3 | 81,036 | XX | | |
| 36,82 | 24 | 87,676 | X | | |
| Contraste | Diferencias | | +/- Límites | | |
| 3,182 - 10 | *-20,5917 | | 10,3921 | | |
| 3,182 - 20 | *-31,2792 | | 9,85881 | | |
| 3,182 - 30 | *-26,66 | | 10,3921 | | |
| 3,182 - 36,818 | *-37,92 | | 13,1451 | | |
| 10 - 20 | *-10,6875 | | 5,69199 | | |
| 10 - 30 | -6,06833 | | 6,57254 | | |
| 10 - 36,82 | *-17,3283 | | 10,3921 | | |
| 20 - 30 | 4,61917 | | 5,69199 | | |
| 20 - 36,818 | -6,64083 | | 9,85881 | | |
| 30 - 36,818 | *-11,26 | | 10,3921 | | |

* Indica una diferencia significativa

Figura 21

Gráfico de medias y 95 % de confianza para la remoción de DQO por Voltaje en aguas residuales del camal municipal de Chota



La prueba de rangos múltiples permite dilucidar que mediasson significativamente distintas de otras partiendo de los valores de las medias globales. Las tablas 22 y 25 indican un P – valor de la prueba de $F < 0,05$ lo que se interpreta que si hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias a un nivel de confianza del 95 %. La tabla 22 indica que para los niveles estudiados, 800 mg/L y 1100 mg/L, 1400 mg/L de FeSO_4 hay cercanía para las medias, de manera similar para los valores de 595,462 mg/L, 1100 g/L y 1604,54 g/L de FeSO_4 , que se perfilan como grupos homogéneos y por ende no tienen diferencias estadísticamente significativas para la remoción de DQO.

En el rango de 800 mg/L — 1604,54 mg/L se evidencia una diferencia significativa que puede estar asociado a interacciones que no contribuye a un efecto sumatorio sobre el porcentaje de remoción de la DQO de acuerdo al modelo matemático ajustado, es decir cualquier aumento en el valor aleja de un proceso de remoción aceptable. La figura 18 grafica la media sobre el porcentaje de remoción de la DQO por la adición de FeSO_4 en aguas residuales del camal municipal de Chota donde se puede observar las similitudes alcanzadas.

En la tabla 23 se observa que para las concentraciones de 600 mg/L, 8000 mg/L y 1000 mg/L de H_2O_2 , las medias calculadas son muy próximas entre sí perfilándose como grupos homogéneos y en consecuencia no presentan diferencias estadísticamente significativas en la remoción de DQO. Para el contraste de la interacción 600 mg/L – 1136,36 mg/L se indica una diferencia estadísticamente significativa para el H_2O_2 lo que supone que no ejercen un efecto colectivo sobre el porcentaje de remoción de la DQO. Las demás interacciones indican que no hay diferencia significativa alguna es decir estas concentraciones comparten similitudes sobre el porcentaje de remoción de la DQO (figura 19).

La tabla 24 resume los valores de las medias para el pH usado durante el proceso de remoción de la DQO donde se visualiza que para los valores 3,5 y 3,8 las medias son muy próximas comportándose como grupos homogéneos y no presentan diferencias estadísticamente significativas. Los pH 2,5 y 3,5 también se observa cercanía para los valores de la media calculada lo que supone que son grupos homogéneos. El valor de pH 3 se alinea con los valores de pH 3,5 y 3,8 es decir se puede interpretar que tiene similitudes con estos grupos estudiados.

Las interacciones 2,16 – 3,0, 2,16 – 3,5 y 2,5 – 3, expresan una diferencia estadísticamente significativa, que puede estar asociada a interacciones que no ejercen un efecto sobre el porcentaje de remoción de la DQO, y por tanto la eficiencia en la remoción de contaminantes se aleja. Para un pH de 3,0 – 3,5, 3,0 – 3,8, no se aprecia ninguna diferencia significativa, en tanto se presume que comparten similitudes para el porcentaje de remoción de la DQO. La figura 20 esboza las similitudes alcanzadas para los valores de pH 3,0, 3,5 y 3,8 las que se clasifican como grupos homogéneos.

La tabla 25 indica los valores de la media para los voltajes utilizados durante la

remoción de la DQO, se observan 3 grupos que guardan similitudes 10V, 20V, 30V y no representan una diferencia estadísticamente significativa sobre la remoción. Las interacciones 3,18V -10V, 3,18V - 20V, 3,18V - 30V, 3,18V - 36,81V, 10V - 20V, 10V - 30V y 30V - 36,82V indican una diferencia estadísticamente significativa lo que supone que no ejercen un efecto favorable para la remoción de la DQO. La interacción de 20V – 30V no muestra diferencia significativa que en efecto comparten similitudes durante la remoción de la DQO. En la figura 21 se plasman las similitudes alcanzadas para los valores 20V y 30V.

3.2.- PROPUESTA TEÓRICA

3.2.1.- Introducción

La tesis enfocada desde la perspectiva del desarrollo de tecnologías avanzadas de oxidación se suma a las diversas alternativas existentes pero que comparada con otras ofrece alta eficacia en remoción de contaminantes, rapidez y costos viables para el tratamiento de aguas residuales de camales cuyo propósito es de brindar una mejora sustancial en lo que respecta a la calidad de los vertimientos sobre cuerpos de agua y suelos teniendo en cuenta el paradigma del desarrollo sostenible.

Se adopta el estudio de una tecnología fundamentada en el sistema Fenton, que dentro de las tecnologías electroquímicas de oxidación avanzada se evalúa específicamente el proceso electro-Fenton-Fere cuya aplicación se fundamenta en alcanzar la optimización de 4 factores esenciales: FeSO_4 , H_2O_2 , pH y Voltaje, para obtener la máxima remoción de los contaminantes en aguas residuales. La optimización de los factores estudiados puede alcanzar niveles atractivos de remoción de contaminantes aún en condición de recalcitrantes en el menor tiempo posible.

3.2.2.- Objetivo

Aplicar el sistema electro-Fenton–Fere para mejorar la características fisicoquímicas de las aguas residuales del camal municipal de Chota.

3.2.3.- Metas

- a. Escalar el sistema electro-Fenton-Fere a nivel piloto.
- b. Diseñar y construir el prototipo del sistema electro-Fenton-Fere a escala piloto.
- c. Poner a disposición el Sistema electro-Fenton-Fere a entes gubernamentales como alternativa eficaz para el tratamiento de las aguas residuales de camales.
- d. Concientizar a las municipalidades que tienen la administración de camales la factibilidad de poner en práctica nuevas tecnologías de tratamiento para las aguas residuales.
- f. Difundir los conocimientos de la presente tesis a través de publicaciones en revistas científicas indexadas, congresos y otros eventos científicos.

3.2.4.- Estrategias

- a. Se elaborará material informativo respecto a las tecnologías avanzadas de oxidación y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.
- b. Se diseñará un spot publicitario que resuma el impacto que genera las aguas residuales de camales en los cuerpos de agua y su alternativa de tratamiento basado en el sistema electro-Fenton-Fere.
- c. Se capacitará estudiantes universitarios que tengan afinidad con el cuidado del ambiente, para la replicación del sistema electro-Fenton-Fere en otros entornos.
- d. Se gestionará entrevistas con representantes de la municipalidad provincial

de Chota y Autoridad Nacional del Agua para masificar el conocimiento del sistema electro-Fenton-Fere como una tecnología eficaz y amigable con el medio ambiente.

- e. Se divulgará en congresos, simposios y otros la experiencia obtenida mediante el sistema electro-Fenton-Fere y su eficacia en el tratamiento de aguas residuales.

3.2.5.- Mecanismos para la masificación del uso del sistema electro-Fenton-Fere

- a. Promover la profundización en la investigación de las tecnologías electro-Fenton en universidades nacionales teniendo como base la presentación de los resultados del presente informe a escala de laboratorio.
- b. Buscar apoyo financiero para la ejecución de prototipos de sistemas electro-Fenton para el tratamiento de aguas residuales.
- c. Presentar proyectos a fondos concursables del CONCYTEC con la finalidad de incentivar el uso de las tecnologías avanzadas de oxidación basadas en las tecnologías electro-Fenton.

3.2.6.- Presupuesto

| Actividad | Medida | cantidad | Costo unitario(Soles) | Sub-total (soles) |
|---|--------|----------|-----------------------|-------------------|
| Material informativo | Unidad | 1000 | 4 | 4000 |
| Diseño de Spot publicitario | Unidad | 1 | 400 | 250 |
| Lanzamiento Spot (3 veces x 10 días) | Unidad | 30 | 80 | 2400 |
| Participación en congresos | Unidad | 5 | 500 | 1500 |
| Masificación del sistema electro-Fenton | Viajes | 6 | 500 | 3000 |
| Diseño y construcción prototipo | Unidad | 1 | 80000 | 80000 |
| Divulgación | Evento | 4 | 1000 | 4000 |
| Imprevistos | Evento | 1 | 2000 | 3000 |
| | | | TOTAL | 137050 |

3.2.7.- Financiamiento

El financiamiento será gestionado a través de la municipalidad provincial de Chota hacia el gobierno regional de Cajamarca y la autoridad Nacional del Agua.

CONCLUSIONES

- 1.- Las aguas residuales del camal municipal de Chota posee un poder contaminante muy elevado (DQO = 5682,01 mg/L) con una gran presencia de microorganismos patógenos debido a la presencia de sangre, desechos fecales con alto contenido lignocelulósico, vísceras, grasas, proteínas, aminos, etc. y restos del faenado de los animales.
- 2.- La aplicación de un sistema electro-Fenton en la categoría de electro-Fenton-Fere y utilizando la metodología de superficie de respuesta mediante el diseño baja composición de Draper-Lin ajustado con un análisis de conveniencia mostraron que los valores óptimos del FeSO_4 , H_2O_2 , pH y voltaje fueron 1098,03 mg/L, 828,4 mg/L, 3,07 y 25,8 V respectivamente, para un tiempo de reacción de 25 minutos usando electrodos de grafito y acero inoxidable con una área efectiva de 22,5 cm² y 2 cm de separación entre ambos a temperatura y presión atmosférica.
- 3.- La aplicación del proceso electro-Fenton-Fere mejoró notablemente el IB de las aguas tratadas de 0,394 a 0,509, ello queda reflejado en la mejora del OD y del ORP que paso de un entorno reductor a oxidante, así también se pudo apreciar una gran mejoría en el color y olor.
- 4.- La cinética de remoción de los contaminantes expresado en DQO reveló que el proceso electro-Fenton-Fere optimizado se aproximó a una cinética de pseudo-primer orden (orden cero aparente) de acuerdo al análisis de los factores de correlación correspondientes, donde la constante cinética óptima de degradación calculada fue de 221.757 mg.L⁻¹min⁻¹.

RECOMENDACIONES

- 1.- Usar campana de extracción y equipo de protección personal ya que los gases que pueden desprender de la reacción pueden representar un riesgo para la salud.
- 2.- Asegurarse en lo posible la eliminación total del peróxido de hidrógeno en las muestras a tratar, puesto que un exceso en el calentamiento en los tubos de prueba se puede propiciar una combustión espontánea que puede traer incidentes o accidentes no deseados.
- 3.- Realizar análisis de carbono orgánico total (COT) a fin de identificar con mayor certeza la formación de productos intermediarios de la reacción y que más bien en algún momento puede representar para la total degradación de los contaminantes.
- 4.- La dosificación de los reactivos de Fenton depende del tipo y características de agua residual a tratar, así como también de las características finales, sin embargo; los resultados obtenidos en ésta investigación son únicas para las condiciones establecidas y por ende bajo otras condiciones es necesario efectuar pruebas preliminares.
- 5.- Estudiar con más detalle los intermediarios de la reacción electro-Fenton, si bien es efectivo el proceso para degradar compuestos de alta toxicidad es probable que se generen intermediarios que pueden presentar una toxicidad mayor que los contaminantes originales. Asimismo, es necesario hacer pruebas bioquímicas para la determinación con exactitud de los microorganismos presentes después del tratamiento

REFERENCIAS

- Adimi, M., Mohammad, M. & Fathinejad, H. (2017). Treatment of petrochemical wastewater by modified electro-Fenton method with nano porous aluminum electrode. *Journal Water Environmental. Nanotechnology*, 2(3), 186 - 194.
URL: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=575381>
- Alizadeh, M. & Barkdoll, B. (2018) Effects of oxalate and persulfate addition to ElectroFenton and ElectroFenton-Fenton processes for oxidation of Ketoprofen: Determination of reactive species and mass balance analysis. *Electrochimica Acta*, 265, 209 - 220.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.153>
- Aquino, P. (2017). Calidad del agua en el Perú: retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales. Lima: DAR
URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2806>
- Arivazhagan, Ch. & Tubakara, F. (2015). Decolorization of distillery spent wash effluent by electro oxidation (EC and EF) and fenton processes: a comparative study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 121, 142 - 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.038>
- Aydiner, C., Kiril, B., Can, E., Cengiz, H., Dagli, S., Aksu, S., Melek, Y., Yagmur, A. & Balci, E. (2019). Novel hybrid treatments of textile wastewater by membrane oxidation reactor: Performance investigations, optimizations and efficiency comparisons. *Science of the Total Environment*, 683, 411-426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.248>.
- Barros, W., Franco, P., Steter, J., Rocha, R. y Lanza, M. (2014). Electro-Fenton degradation of the food dye amaranth using a gas diffusion electrode modified with cobalt (II) phthalocyanine. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 46 (53), 722 – 723.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2014.03.027>
- Becerra L., Horna, M. y Barrionuevo, K. (2014). Nivel de contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región de la Libertad. *Revista del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, 7(3), 23 - 26.
URL: https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/03/1052078/rcm-v7-n3-2014_pag23-26.pdf
- Borja, D., Salazar, K. y Brito, H. (2019). Cuantificación de efluentes de aguas residuales del Camal Frigorífico Riobamba. *Ciencia Digital*, 3(2), 783-794.
URL: <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/497/1205>
- Brillas, E. & Martínez-Huitle, C. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electro-Chemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166 - 167, 603 - 643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>
- CAPRE, ANDESAPA, OPS/CEPIS y GTZ. (1992). *Aguas residuales de mataderos y plantas procesadoras de carne*. San José: ATV.
- Cardoso, D. (2020). *Evaluación de los procesos Electro-Fenton y Coagulación-Floculación para el tratamiento de efluentes generados en la planta de beneficio animal del municipio de Girardot, Cundinamarca*. [Tesis de grado, Universidad el Bosque, Bogotá]. Archivo digital.
URL: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/3956>
- Carrasquero-Ferrer S., Pire-Sierra M., Rincón-Lizardo N. y Díaz-Montiel A. (2014). Monitoreo de la remoción biológica de nitrógeno en efluentes de tenerías usando un reactor por carga secuencial. *Ingeniería Investigación y tecnología* 15(2), 287-298.
URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v15n2/v15n2a11.pdf>
- Carrillo, A. (2017). Globalización: Revolución industrial y sociedad de la información. *Revista Ciencia*, 19(2), 269 – 284.
URL: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/ciencia/article/viewFile/535/448>
- Cedeño-Muñoz, H. (2020). Análisis de los parámetros de calidad del agua del efluente del río

- muerto para su posible reutilización del Cantón Manta, Ecuador. *Polo Del Conocimiento*, 5(2), 579 - 604. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7435323>
- Celebi, M., Oturan, N., Zazou, H., Hamdani, M. & Oturan, M. (2015). Electrochemical oxidation of carbaryl on platinum and boron-doped diamond anodes using electro-Fenton technology. *Separation and Purification Technology*, 156, 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.025>
- Cruz-González, G. Julcour, C. y Jáuregui-Haza, U. (2017). El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. *Revista Cubana de Química*, 29(3), 492-516. https://www.redalyc.org/pdf/4435/Resumenes/Abstract_443552968013_2.pdf
- Cusiche, L. y Miranda, G. (2019) Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional Lago Junín, Perú. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1433 – 1447. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870>
- Chávez, E. (2006). *Construcción de dos celdas electroquímicas escala laboratorio para la electrogeneración del reactivo de Fenton y para oxidación Anódica*. [Tesis maestra, Universidad Nacional Autónoma de México]. Archivo digital. URL:<https://repositorio.unam.mx/>
- Chávez-Vera, I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*. 3(1), 536 – 560. <http://dx.doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.1.mar.536-560>
- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R. y Climent, J. (2017). *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua*. Publicaciones de la Universidad de Jaume I. URL:<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/168282/9788416546305.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Chuptaya, G. y Huamán, N. (2020). Tratamiento de aguas residuales domésticas en un sistema Down-Flow Hanging Sponge (DHS) de tercera generación. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 60-69. URL: https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index
- Davarnejad, R., & Nasiri, S. (2017). Slaughterhouse wastewater treatment using an advanced oxidation process: Optimization study. *Environmental Pollution*, 223, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.008>
- Diomedi, A., Chacón, E., Delpiano, L., Hervé, B. Jemenao, I., Medel, M., Quintanilla, M., Riedel, G., Tinoco, J. y Cifuentes, M. (2017). Antisépticos y desinfectantes: apuntando al uso racional. Recomendaciones del Comité Consultivo de Infecciones Asociadas a la Atención de Salud, *Sociedad Chilena de Infectología. Revista Chilena Infectología*, 34 (2), 156-174. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182017000200010>
- El-Doseky, H., Ghoneim, M. & Zidan, N. (2010). Decolorization and degradation of Ponceau S azo-dye in aqueous solutions by the electrochemical advanced Fenton oxidation. *Desalination*, 264(2), 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.018>
- Escalante, V. y Bandala, E. (2014). Calidad del agua y su relación con los alimentos: Aplicación de procesos Fenton y tipo Fenton en la eliminación de contaminantes del agua. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(1), 34 - 47. URL:<https://tsia.udlap.mx/calidad-del-agua-y-su-relacion-con-alimentos-aplicacion-de-procesos-fenton-y-tipo-fenton-en-la-eliminacion-de-contaminantes-en-agua/>
- Fernández, M., Iglesias, O., Pazos, M. & Sanromán, M. (2014). Application of electro-Fenton Technology to remediation of polluted effluents by self-sustaining process. *The Science Would Journal*, 1 - 8. <https://doi.org/10.1155/2014/801870>
- Fontmorin, J. y Sillanpaa, M. (2015). Bioleaching and combined bioleaching/Fenton-like processes for the treatment of urban anaerobically digested sludge: removal of heavy metals and improvement of the sludge dewaterability. *Separation and Purification Technology*, 156, 655-664. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.061>

- García, O. (2016). *Hierro soportado en sólidos como fuente de hierro para el proceso Fenton, electro-Fenton y fotoelectroFenton: ¿una verdadera generación heterogénea del reactivo fenton o simplemente un proceso homogéneo?*. [Tesis doctoral, centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica. México]. Archivo digital.
URL: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/357/1/Hierro%20soportado%20en%20s%C3%B3lidos%20como%20fuente%20de%20hierro%20para%20el%20proceso%20fenton%2C%20electro-fenton%20y%20foto-electrofenton%20%C2%BFUna%20verdadera%20generaci%C3%B3n%20heterog%C3%A9nea%20del%20reactivo%20fenton%20o%20simplemente%20un%20proceso%20homog%C3%A9neo.pdf>
- Gaviria-Acosta, E., Benitez-Benitez, R., Lenis, L. y Hoyos-Concha, J. (2015). Optimización de la hidrólisis enzimática de proteínas presentes en semillas de guandul (*cajanus cajan*). *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(2), 114-122.
URL: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v13n2/v13n2a13.pdf>
- Ghoneim, M., El-Desoky, H. & Zidan, N. (2011). Electro-Fenton oxidation of Sunset Yellow FCF azo-dye in aqueous solutions. *Desalination*, 274, 22–30.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.062>
- Gilpavas, E. (2014). Degradación y mineralización de tartrazina mediante electro- oxidación. Optimización de las condiciones de operación. *Información Tecnológica*, 25(4), 163 - 174.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000400018>
- Gilpavas, E., Arbeláez-Castaño P., Medina-Arroyave J., Gómez-Atehortua, C. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 157-167.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- GilPavas E., Dobrosz-Gómez I. & Gómez-García M. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal Environmental Management*. 191, 189-197.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Guadarrama-Brito, M. y Galván, A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 4(7), 22– 44.
<https://doi.org/10.23913/ciba.v4i7.29>
- Gutiérrez, C. (2020). *Depuración fotoquímica- electroquímica de compuestos orgánicos persistentes en agua residual sintética de la industria textil Puente Piedra Lima*. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú]. Archivo digital.
URL: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/15483/Gutierrez_c.c.pdf?sequence=1
- Habla Cajamarca la Beta Radio (4 de julio 2019). Chota: camal municipal sirve como vivienda de los gallinazos [Publicación]. Facebook.
<https://www.facebook.com/Cajamarcalabetaradio/posts/1794221234014605>
- Hammouda, S., Fourcade, F., Assadi, A., Soutrel, I., Adhoum, N., Amrane, A. & Monser, L. (2016). Effective heterogeneous electro-Fenton process for the degradation of a malodorous compound, indole using iron loaded alginate beads as a reusable catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 182, 47 – 58.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.09.007>
- He, H., & Zhou, Z. (2017). Electro-Fenton process for water and wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(21), 2100–2131.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1405673>
- Heng, L. (2015). *Removal of organic pollutants from water by electro-Fenton y electro- Fenton like processes*. Université Paris-Est. Paris: HAL.
URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01336262>
- Kuleyin, A., Gok, A. & Akbal, F. (2021). Treatment of textile industry wastewater by electro-Fenton

- process using graphite electrodes in batch and continuous mode. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104782.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104782>
- Larios-Meño, J., González, C. y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer, Revista de la facultad de ingeniería de la USIL*, 2 (2), 9 – 25
 URL: <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- Lei, H., Li, H., Li, Z. Li, Z., Chen, K., Zhang, X y Wang, H. (2010). Electro-Fenton degradation of cationic red X-GRL using an activated carbon fiber cathode. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(6), 431 – 438. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.06.005>
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciaAmérica*, 3(1), 34-39.
 URL: <http://cienciamerica.uti.edu.ec/openjournal/index.php/uti/article/view/30>
- Machdar, I., Onodera, T., Syutsubo, K., & Ohashi, A. (2018). Effects of sponge pore-size on the performance of a down-flow hanging sponge reactor in post-treatment of effluent from an anaerobic reactor treating domestic wastewater. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.07.001>
- Medina, C., Uriarte, W., Cárdenas, E. y Orrego, S. (2020). Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process. *Revista Ingeniería UC*, 27(2), 165 – 174.
 URL: <https://www.redalyc.org/journal/707/70764230005/>
- Mirshahghassemi, S., Aminzadeh, B., Torabian, A. & Afshinnia, K. (2017). Optimizing electrocoagulation and electro-Fenton process for treating car wash wastewater. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(1), 37 - 43.
 URL: <http://ehemj.com/article-1-234-en.html>
- Montes -Valencia, N. (2015). La Industria Química: Importancia y Retos. *Lámpsakos*, 14, 72-85.
 URL: <Downloads/Dialnet-LaIndustriaQuimica-5224840.pdf>
- Moussavi, G. & Aqanaghad, M. (2015). Performance evaluation of electro-Fenton process for pretreatment and biodegradability improvement of a pesticide manufacturing plant effluent. *Sustainable Environmental Research*, 25(5), 249 - 254.
 URL: https://www.researchgate.net/publication/282902867_Performance_evaluation_of_electroFenton_process_for_pretreatment_and_biodegradability_improvement_of_a_pesticide_manufacturing_plant_effluent
- Muñoz, S. y Sánchez, R. (2018). El agua en la industria alimentaria. *Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica*, 33(2), 157-171.
<https://doi.org/10.23853/bsehm.2018.0571>
- Nichela, D. (2012). *Estudio del mecanismo y la cinética de degradación de contaminantes aromáticos, empleando reacciones tipo Fenton, Electro-Fenton y Foto-Fenton*. [Tesis doctoral, Universidad de La Plata]. Archivo digital.
 URL: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/2630>
- Nidheesh, V. & Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1 - 15.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.011>
- Nguyen, H., Le, H., Dinh, N. & Phan, T. (2018). A research on the performance of down-flow hanging sponge (DHS) reactor treating domestic wastewater. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56(4), 482– 492. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/56/4/10878>
- Oturan. M. y Aaron, J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Enviromental Science and Technology*, 44(23), 2577 - 2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- Paramo-Vargas, J., Camargo, A., Gutiérrez-Granados, S., Godinez, L., & Peralta-Hernández, J. (2015). Applying electro-Fenton process as an alternative to a slaughterhouse effluent

- treatment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 80-86.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.07.002>
- Paúcar, F. y Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. *South Sustainability*, 1(1), 1-11. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-004>
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29(3), 3-14.
<https://doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>
- Popat, A. Nidheesh, P. Anantha, T. & Suresh, M. (2019). Mixed industrial wastewater treatment by combined electrochemical advanced oxidation and biological processes. *Chemosphere* 237, 124419. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124419>
- Pourzamani, H., Hajizadeh, Y., & Mengelizadeh, N. (2018). Application of three-dimensional electro-Fenton process using MWCNTs-Fe₃O₄ nanocomposite for removal of diclofenac. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 271-284
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.014>
- Pushpalatha, M. & Krishna, M. (2017). Electro-Fenton process for waste water treatment a review. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3(1), 439 - 451.
 URL:<https://www.ijariit.com/manuscript/electro-fenton-process-wastewater-treatment-review/>
- Qiu, S., He, D., Ma, J., Liu, T. & Waite, T. (2015). Kinetic modeling of the electro-Fenton process: Quantification of reactive oxygen species generation. *Electrochimica. Acta*, 176, 51-58.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.103>
- Quille, G. y Donaires, T. (2013). Tratamiento de efluentes líquidos y sólidos del camal municipal de Ilave. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 15(1), 65 - 72.
<https://doi.org/10.18271/ria.2013.17>
- Rahmani, A., Hossieni, E. & Poormohammadi, A. (2015). Removal of Chromium (VI) from aqueous solution using electro-Fenton Process. *Environmental Processes.*, 2(2), 419 - 428. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0068-4>
- Ramos, C. (2015). Los paradigmas de la investigación científica. *Avances en. Psicología.*, 23(1), 9 - 17.
 URL:http://www.unife.edu.pe/publicaciones/revistas/psicologia/2015_1/Carlos_Ramos.pdf
- Rivera, P., Chávez, R. y Rivera, F. (2018). Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 9(1), 113 -123.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-08>
- Rodas M. y Botello S. (2016). Actividad hidrolítica de aislados bacterianos con potencial aplicación en el tratamiento de efluentes de frigorífico. *Revista Colombiana de Ciencia Animal* 8(1), 37-43. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n1.2016.202>
- Rodríguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D. y Saltiel, G. (2020). De residuo a Recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Banco Mundial, Washington, DC.
 URL:<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- Rubio-Clemente, A., Chica, E. y Pañuela, G. (2014). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 211 – 223.
 URL: <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a19.pdf>
- Ruiz, E., Hernández-Ramírez, A., Peralta-Hernández, J., Arias, C. & Brillas, E. (2011). Application of solar photoelectro-Fenton technology to azo dyes mineralization: Effect of current density, Fe²⁺ and dye concentrations. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 385-392.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.004>

- Sani, S., Fereidonian, A., & Adnan, R. (2020). Applications of Fenton oxidation processes for decontamination of palm oil mill effluent: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 7302 – 7323. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.08.009>
- Sathya, U., Keerthi, Nithya, M. & Balasubramanian, N. (2019). Evaluation of advanced oxidation processes (AOPs) integrated membrane bioreactor (MBR) for the real textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 246, 768- 775. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.039>
- Sedaghat, M. Aber, B., Rasoulifard, S., Khataee, M., & Nezamaldin, A. (2016). Electrochemical and photo-assisted electrochemical treatment of the pesticide imidacloprid in aqueous solution by the Fenton process: effect of operational parameters. *Research on Chemical Intermediates*, 42 (2), 855 - 868. URL: <https://chem.ckcest.cn/Journal/Details?id=855856>
- Smith J. M. (1991). *Ingeniería de la Cinética Química*. (6º ed.): Mc-Graw-Hill. URL:https://www.academia.edu/31609531/Ingenieria_de_la_cinetica_quimica_J_M_Smith
- UNESCO (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*, París. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- Ulucan, K. & Kurt, U. (2015). Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 747, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.04.005>
- Vilardi, G., Bavasso, I., Scarsella, M., Verdone, N., & Di Palma, L. (2020). Fenton oxidation of primary municipal wastewater treatment plant sludge: Process modelling and reactor scale-up. *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 46 -59. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.002>
- Villena, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*. 35(2), 304-308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- Yazici, S., Dincer, K. & Varank, G. (2019). Performance of electrocoagulation and electro-Fenton processes for treatment of nanofiltration concentrate of biologically stabilized landfill leachate. *Journal of Water Process Engineering*, 3, 100863. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100863>
- Zahra, H., Mohsen, M. & Nemat, A. (2015). Application of electro-Fenton (EF) Process to the Removal Pentachlorophenol from aqueous solutions. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 4(4), 76-87. <https://doi.org/10.22050/IJOGST.2016.12481>
- Zhang, H., Wang, Z., Liu, C., Guo, Y., Shan, N., Meng, C. & Sun, L. (2014). Removal of COD from landfill leachates by an electro/Fe²⁺/peroxydisulfate process. *Chemical Engineering Journal*, 250, 76 - 82. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.114>
- Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D. & Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of the Total Environment*, 670, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>
- Zhang, W., Wang, H. & Wang, F. (2007). "Promotion of H₂O₂ decomposition activity over β-MnO₂ nanorod catalysts. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 304, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.04.022>

ANEXOS

Anexo A: análisis fisicoquímico inicial y final y microbiológico presuntivo en las aguas residuales del camal de Chota.

Anexo B: Historial de animales beneficiados 2018.

Anexo C: memoria fotográfica del desarrollo experimental, equipos y reactivos.

Anexo D: Reporte y recibo digital de TURNITIN

ANEXO A



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITA: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|---------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual | Análisis N° | : 01 |
| Lugar | : Camal municipal | Fecha de muestreo | : 28/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 28/11/2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento: | Cajamarca | Método de muestreo: | Azar |

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

| PARAMETRO | EXPRESADO COMO | RESULTADOS |
|---------------------------------|--------------------------|------------|
| Turbiedad | FNU | 596 |
| Resistividad | MΩ.cm | 0.0008 |
| Conductividad | μS/cm | 1308 |
| Oxígeno disuelto (OD) | ppm | 4.20 |
| Potencial óxido-reducción (ORP) | mV | -86.5 |
| PH | pH - 14 | 8.18 |
| Alcalinidad total | ppm de CaCO ₃ | 1280 |
| Dureza total | ppm de CaCO ₃ | 1440 |
| Dureza cálcica | ppm de CaCO ₃ | 480 |
| Dureza magnésica | ppm de CaCO ₃ | 960 |
| Sólidos totales | ppm de CaCO ₃ | 8410 |
| Sólidos sedimentables | mL/L | 42 |
| Cloruros | g/L | 1.84 |
| Temperatura | °C | 19 |

MÉTODO NORMALIZADO PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN BIOQUÍMICA Y QUÍMICA

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅): ROB 5 DÍAS

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): REFLUJO CERRADO, MÉTODO FOTOMÉTRICO

| PARÁMETRO | RESULTADO |
|-------------------------------|--------------|
| Demanda bioquímica de oxígeno | 2241.66 mg/L |
| Demanda química de oxígeno | 5682.01 mg/L |



WILMER ORTIZ TIRADO
INGENIERO QUÍMICO
REG. CIP. 181344



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITA: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|--------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual | Análisis N° | : 02 |
| Lugar | : camal municipal | Fecha de muestreo | : 28/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 28/11/2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento | : Cajamarca | Método de muestreo | : Azar |

TIEMPO DE CONTACTO ÓPTIMO DEL PROCESO ELECTROFENTON: CORRIDAS EXPERIMENTALES

- CONDICIONES:

DQO_{inicial} = 5682.01 mg/L

Amperaje: 8.7 A/m²

Electrodos: Acero inoxidable / Grafito

Distancia entre electrodos: 2 cm

pH = 3

T° = ambiente

MUESTRA 1: 800 mg/L FeSO₄·7H₂O, 600 mg/L H₂O₂, 10 V.

MUESTRA 2: 1400 mg/L FeSO₄·7H₂O, 1000 mg/L H₂O₂, 30 V.

| TIEMPO (Minutos) | MUESTRA 1 | | MUESTRA 2 | |
|---------------------|------------------|----------|------------------|------------|
| | DQO FINAL (mg/L) | REMOCIÓN | DQO FINAL (mg/L) | % REMOCIÓN |
| 0 | 5682.01 | 0.0 % | 5682.01 | 0.0 % |
| 5 | 4920.62 | 13.4 % | 4405.62 | 22.4 % |
| 10 | 4079.68 | 28.2 % | 3540.96 | 37.7 % |
| 15 | 2964.51 | 47.8 % | 2306.89 | 59.4 % |
| 20 | 2079.62 | 63.4 % | 1215.95 | 78.6 % |
| 25 | 1338.15 | 76.4 % | 844.06 | 85.1 % |
| 30 | 1358.74 | 76.1 % | 1049.94 | 81.5 % |
| 35 | 1318.22 | 76.8 % | 905.82 | 84.0 % |
| 40 | 1399.91 | 75.4 % | 782.30 | 86.2 % |
| 45 | 1296.98 | 77.1 % | 947.00 | 83.3 % |
| 50 | 1380.73 | 75.7 % | 720.54 | 87.3 % |
| 55 | 1358.74 | 76.1 % | 926.41 | 83.7 % |
| 60 | 1255.81 | 77.8 % | 885.24 | 84.4 % |




WILMER URIARTE TIRADO
INGENIERO QUÍMICO
REG. CIP. 181344



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITA: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|---------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual | Análisis N° | : 03 |
| Lugar | : camal municipal | Fecha de muestreo | : 28/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 28 al 30 / 11/ 2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento: | Cajamarca | Método de muestreo: | Azar |

CORRIDAS EXPERIMENTALES DE APLICACIÓN DEL PROCESO ELECTROFENTON

DQO_{inicial} = 5682.01mg/L

Amperaje: 8.7 A/m²

Electrodos: Acero inoxidable /Grafito

Distancia entre electrodos: 2 cm

pH = 3 T°: ambiente

| N° EXP. | MUESTRA INICIAL | | REPLICA 1 | | REPLICA 2 | |
|------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | DQO _{FINAL} (mg/L) | REMOCIÓN | DQO _{FINAL} (mg/L) | REMOCIÓN | DQO _{FINAL} (mg/L) | REMOCIÓN |
| 1 | 1255.81 | 77.89 | 1482.26 | 73.91 | 1544.02 | 72.83 |
| 2 | 1811.65 | 68.11 | 2038.11 | 64.13 | 1646.96 | 71.01 |
| 3 | 1296.98 | 77.17 | 1255.81 | 77.89 | 1358.74 | 76.08 |
| 4 | 1873.42 | 67.03 | 1646.96 | 71.01 | 1544.02 | 72.83 |
| 5 | 1255.81 | 77.89 | 1420.50 | 75.00 | 1152.87 | 79.71 |
| 6 | 1770.48 | 68.84 | 1811.65 | 68.12 | 1935.17 | 65.94 |
| 7 | 844.06 | 85.15 | 1132.28 | 80.07 | 1296.98 | 77.17 |
| 8 | 1811.65 | 68.12 | 1585.19 | 72.10 | 1523.44 | 73.18 |
| 9 | 1708.72 | 69.93 | 1523.44 | 73.19 | 1420.50 | 75.00 |
| 10 | 679.37 | 88.04 | 452.91 | 92.03 | 741.13 | 86.95 |
| 11 | 1358.74 | 76.08 | 1544.02 | 72.82 | 1482.26 | 73.91 |
| 12 | 617.61 | 89.13 | 391.15 | 93.11 | 555.85 | 90.22 |
| 13 | 2449.85 | 56.88 | 2264.57 | 60.14 | 1811.65 | 68.11 |
| 14 | 1255.81 | 77.89 | 1358.74 | 76.08 | 1194.05 | 78.98 |
| 15 | 3129.22 | 44.93 | 2779.24 | 51.08 | 2655.72 | 53.26 |
| 16 | 638.19 | 88.76 | 782.31 | 86.23 | 679.37 | 88.04 |
| 17 | 514.67 | 90.94 | 555.85 | 90.22 | 391.15 | 93.11 |
| 18 | 452.91 | 92.03 | 617.61 | 89.13 | 514.67 | 90.94 |



[Signature]
WILMER URBATE TIERRADO
INGENIERO QUÍMICO
REG. CIP. 181344

REMOCIÓN DE LA DQO EN MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES DE CAMAL A CONDICIONES ÓPTIMAS DEL PROCESO ELECTRO-FENTON

Muestra de agua residual del camal: $DQO_{total\ inicial} = 5682.01\text{ mg/L}$

Factor de dilución: sin dilución

- FACTORES OPTIMIZADOS

$FeSO_4 \cdot 7H_2O$: 1098.03 mg/L

H_2O_2 : 828.4 mg/L

pH: 3.07

Voltaje: 25.8 V

Temperatura: ambiente

Distancia entre electrodos: 2 cm

| MUESTRA DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL DE CHOTA | |
|---|-----------------|
| DQO Final (mg/L) | REMOCIÓN OPTIMA |
| 602.29 | 89.43% |

CINÉTICA DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO ELECTROFENTON SOBRE AGUAS RESIDUALES A CONDICIONES ÓPTIMAS.

Muestra de agua residual del camal: $DQO_{total\ inicial} = 5682.01\text{ mg/L}$

Factor de dilución: 7

- FACTORES OPTIMIZADOS

$FeSO_4 \cdot 7H_2O$: 1098.03 mg/L

H_2O_2 : 828.4 mg/L

pH: 3.07

Voltaje: 25.8 V

Temperatura: ambiente

Distancia entre electrodos: 2 cm

| TIEMPO (MIN) | DQO FINAL (mg/L) | REMOCIÓN |
|--------------|------------------|----------|
| 5 | 4817.66 | 15.2 % |
| 10 | 3664.48 | 35.5 % |
| 15 | 2449.85 | 56.8 % |
| 20 | 967.59 | 82.9 % |
| 25 | 602.29 | 89.4 % |



[Handwritten Signature]
 WILMER URQUIE TIRADO
 INGENIERO QUÍMICO
 REG. CIP. 181344



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS DE AGUAS

SOLICITA: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|---------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual tratada | Análisis N° | : 04 |
| Lugar | : camal municipal | Fecha de muestreo | : 29/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 29/11/2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento: | Cajamarca | Método de muestreo: | Azar |

ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

| PARAMETRO | EXPRESADO COMO | RESULTADOS |
|---------------------------------|------------------------|------------|
| Turbiedad | FNU | 1.2 |
| Resistividad | MQ.cm | 0.0005 |
| Conductividad | μ S/cm | 2210 |
| Oxígeno disuelto (OD) | ppm | 85.1 |
| Potencial óxido-reducción (ORP) | mV | 56 |
| Ph | 0 - 14 | 7.3 |
| Alcalinidad total | ppm de CaCO_3 | 144 |
| Dureza total | ppm de CaCO_3 | 188 |
| Dureza cálcica | ppm de CaCO_3 | 108 |
| Dureza magnésica | ppm de CaCO_3 | 80 |
| Sólidos totales | ppm de CaCO_3 | 104 |
| Sólidos sedimentables | mL/L | 0 |
| Cloruros | g/L | 2.05 |
| Temperatura | °C | 19.4 |

MÉTODO NORMALIZADO PARA ANÁLISIS DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL, APHA, AWWA, WPCF

INDICADORES DE CONTAMINACIÓN BIOQUÍMICA Y QUÍMICA

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO5): ROB 5 DIAS

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO): REFLUJO CERRADO, METODO FOTOMÉTRICO

| PARÁMETRO | RESULTADO |
|-------------------------------|-------------|
| Demanda bioquímica de oxígeno | 307.16 mg/L |
| Demanda química de oxígeno | 602.29 mg/L |



Wilmer Uriarte
WILMER URIARTE
INGENIERO QUÍMICO
REG. CIP. 181344



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

SOLICITADO POR: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|---------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual sin tratamiento | Análisis N° | : 01 |
| Lugar | : Camal municipal | Fecha de muestreo | : 28/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 28/11/2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento: | Cajamarca | Método de muestreo: | Azar |

TIPO DE ANÁLISIS: PRESUNCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS

Metodología:

- Siembra en superficie con diluciones de Mc. Farman
- Tiempo de incubación: 24 horas días a 37 °C con lectura a las 48 horas

| TIPO DE MICROORGANISMO | MEDIO DE CULTIVO | PRESUNCIÓN | Ufc ($10^{-1} - 10^{-6}$) |
|-------------------------|-------------------|------------|-----------------------------|
| Crecimiento bacteriano | Agar nutritivo | Positivo | incontables |
| Enterobacterias | Mac Conkey agar | Positivo | incontables |
| Salmonella Shigella | SS agar | Positivo | incontables |
| Vibrio Cholerae | TBCS agar | Positivo | Incontables |
| Vibrio Parahaemolyticus | | | |
| Levaduras | Saboraud Dextrosa | Positivo | incontables |

Nota: Realizado en laboratorio no acreditado

TIPO DE ANÁLISIS: IDENTIFICACIÓN DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES

Metodología:

- Técnica de dilución en tubo múltiple (NMP)
- Tiempo de incubación: 24 horas días a 37 °C

| TIPO DE MICROORGANISMO | MEDIO DE CULTIVO | Identificación |
|----------------------------|----------------------|----------------|
| Coliformes termotolerantes | Agar Brilla 2% bilis | Positivo |



L.C. Ing. MSc. SALVADOR PÉREZ ORRERO ZAPÓ
INGENIERO DE BIOTECNOLOGÍA Y BIOPROCESOS
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

Analista



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
LABORATORIO DE AGUAS - PROCESO FENTON

REPORTE DE ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

SOLICITADO POR: CARLOS JAVIER MEDINA VALDERRAMA

| | | | |
|---------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Muestra | : Agua residual con tratamiento | Análisis N° | : 02 |
| Lugar | : Camal municipal | Fecha de muestreo | : 30/11/2018 |
| Distrito | : Chota | Fecha de análisis | : 30/11/2018 |
| Provincia | : Chota | Muestreado por | : Carlos J. Medina V. |
| Departamento: | Cajamarca | Método de muestreo: | Azar |

TIPO DE ANÁLISIS: PRESUNCIÓN DE MICROORGANISMOS PATÓGENOS

Metodología:

- Siembra en superficie con diluciones de Mc. Farman
- Tiempo de incubación: 24 horas días a 37 °C con lectura a las 48 horas

| TIPO DE MICROORGANISMO | MEDIO DE CULTIVO | PRESUNCIÓN |
|-------------------------|-------------------|------------|
| Crecimiento bacteriano | Agar nutritivo | Negativo |
| Enterobacterias | Mac Conkey agar | Negativo |
| Salmonella Shigella | SS agar | Negativo |
| Vibrio Cholerae | | |
| Vibrio Parahaemolyticus | TBCS agar | Negativo |
| | Saboraud Dextrosa | Negativo |

Nota: Realizado en laboratorio no acreditado

TIPO DE ANÁLISIS: IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS TERMOTOLERANTES

Metodología:

- Técnica de dilución en tubo múltiple (NMP)
- Tiempo de incubación: 24 horas días a 37 °C

| TIPO DE MICROORGANISMO | MEDIO DE CULTIVO | PRESUNCIÓN |
|----------------------------|----------------------|------------|
| Coliformes termotolerantes | Agar Brilla 2% bilis | Negativo |

CONCLUSIÓN: No se observó crecimiento en placa después del 5° día ni presencia de gas en los tubos, sin embargo; se recomienda hacer pruebas bioquímicas.



Lic. Bgo. Moisés SALAZAR ROMERO ZAPO
LABORATORIO DE AGUAS Y MICROBIOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

Analista

ANEXO B

CUADRO N° 02
ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE JUNIO 2 018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPCH (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|---|
| | M | H | B | M | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 39 | 94 | 38 | 95 | 133 | 3810 | 10350 | 14160 | 1330,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 14 | 24 | 24 | 14 | 38 | 280 | 420 | 700 | 190,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 313 | 298 | 521 | 90 | 611 | 18145 | 16595 | 34740 | 3055,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 366 | 416 | 583 | 199 | 782 | 22235 | 27365 | 49600 | 4575,00 |


MUNICIPIO PROVINCIA DE CHOTA
REG. DEL MUNICIPIO PROVINCIA DE CHOTA
2018 CAMAL MUNICIPAL

CUADRO N° 02
ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE JULIO 2 018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPCH (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|---|
| | M | H | B | M | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 54 | 104 | 52 | 106 | 158 | 5580 | 11150 | 16730 | 1580,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 5 | 18 | 19 | 4 | 23 | 125 | 310 | 435 | 115,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 234 | 244 | 415 | 63 | 478 | 12545 | 14350 | 26895 | 2390,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 293 | 366 | 486 | 173 | 659 | 18250 | 25810 | 44060 | 4085,00 |

CUADRO N° 03
ANIMALES BENEFICIADOS SEGÚN ESPECIE EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE AGOSTO 2 018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| | M | H | B | M | | M | H | TOTAL |
| VACUNOS | 37 | 118 | 51 | 104 | 155 | 3720 | 12820 | 16540 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| OVINOS | 6 | 28 | 26 | 8 | 34 | 105 | 510 | 615 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PORCINOS | 227 | 292 | 466 | 53 | 519 | 12385 | 12385 | 24770 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 270 | 438 | 543 | 165 | 708 | 16210 | 25715 | 41925 |

CUADRO N° 02
ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE SEPTIEMBRE 2018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPCH (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|---|
| | M | H | B | M | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 51 | 102 | 56 | 97 | 153 | 5480 | 11110 | 16590 | 1530,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 20 | 11 | 17 | 14 | 31 | 430 | 205 | 635 | 155,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 288 | 199 | 425 | 62 | 487 | 25205 | 8885 | 34090 | 2435,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 359 | 312 | 498 | 173 | 671 | 31115 | 20200 | 51315 | 4120,00 |

CUADRO N° 02
ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE OCTUBRE 2 018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPC.H (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|--|
| | M | H | B | M | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 57 | 113 | 70 | 100 | 170 | 6470 | 12450 | 18920 | 1700,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 12 | 20 | 19 | 13 | 32 | 220 | 370 | 590 | 160,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 285 | 246 | 451 | 80 | 531 | 25200 | 13425 | 38625 | 2655,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 354 | 379 | 540 | 193 | 733 | 31890 | 26245 | 58135 | 4515,00 |

ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE NOVIEMBRE 2018

| ESPECIES | SEXO | | HIGADO | | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPCH (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|--|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|---|
| | M | H | B | M | | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 38 | 118 | 58 | 98 | | 156 | 4380 | 12570 | 16950 | 1560,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 19 | 19 | 21 | 17 | | 38 | 370 | 330 | 700 | 190,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 227 | 265 | 418 | 74 | | 492 | 11515 | 13590 | 25105 | 2460,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 284 | 402 | 497 | 189 | | 686 | 16265 | 26490 | 42755 | 4210,00 |

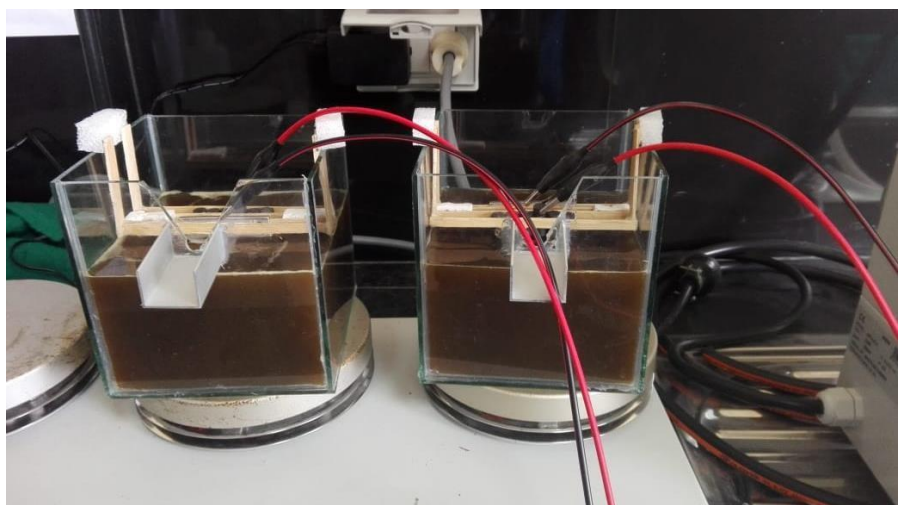
CUADRO N° 02
ANIMALES BENEFICIADOS EN EL CAMAL MUNICIPAL DE CHOTA
MES DE DICIEMBRE 2 018

| ESPECIES | SEXO | | | | HIGADO | | | TOTAL ANIMALES BENEFICIADOS | PESO CARCASA (KG) | | | DINERO DEPOSITADO EN CAJA DE LA MPCH (Nuevos Soles) |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|--------|---|--------------|-----------------------------|-------------------|--------------|--------------|---|
| | M | H | B | M | B | M | M | | M | H | TOTAL | |
| VACUNOS | 55 | 101 | 57 | 89 | | | 6210 | 156 | 6210 | 11030 | 17240 | 1560,00 |
| VACUNOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| VACUNOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| OVINOS | 17 | 20 | 23 | 14 | | | 345 | 37 | 345 | 360 | 705 | 185,00 |
| CAPRINOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS | 289 | 264 | 474 | 79 | | | 14775 | 553 | 14775 | 15075 | 29850 | 2765,00 |
| PORCINOS BENEF. DE EMERGENCIA | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| PORCINOS INCINERADOS | 0 | 0 | 0 | 0 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,00 |
| TOTAL | 361 | 385 | 554 | 182 | | | 21330 | 746 | 21330 | 26465 | 47795 | 4510,00 |

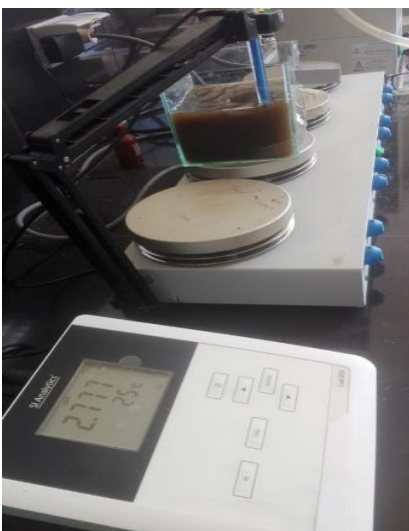
ANEXO C



Toma de muestras en el punto descarga de las aguas residuales



Celdas electroquímicas utilizadas en el proceso electro-Fenton – Fere



pHmetro para el control de la acidez y basicidad durante el proceso electro-Fenton-Fere



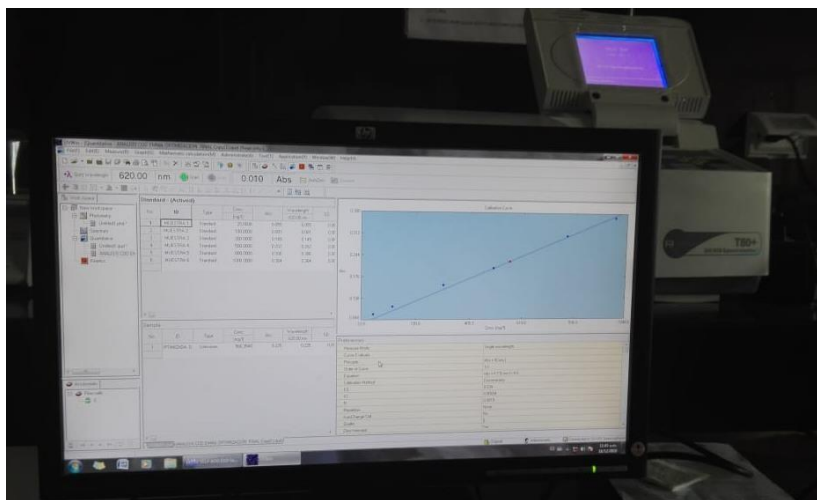
Análisis microbiológico presuntivo en aguas residuales objeto de estudio



Equipo termoreactor



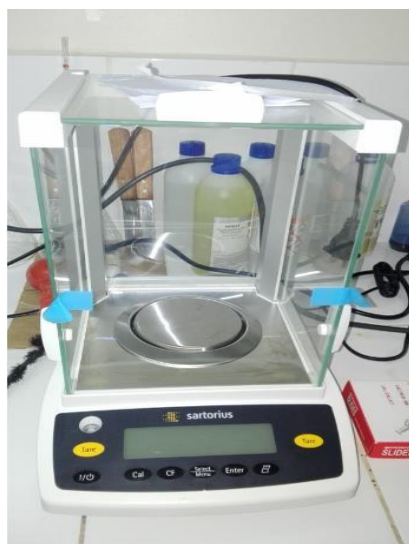
Equipo de análisis de DBO



Equipo espectrofotómetro para el análisis de la DQO



Equipo secador para secado de muestras analíticas



Balanza analítica



Dosificador de muestras



Viales para análisis de la DQO

ANEXO D

Sistema electro-Fenton

INFORME DE ORIGINALIDAD

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------------------|
| 15% | 14% | 2% | 2% |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJOS DEL ESTUDIANTE |

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|----------|--|---------------|
| 1 | repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet | 9% |
| 2 | Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante | 1% |
| 3 | bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet | <1% |
| 4 | hdl.handle.net Fuente de Internet | <1% |
| 5 | repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet | <1% |
| 6 | www.scielo.org.pe Fuente de Internet | <1% |
| 7 | Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante | <1% |
| 8 | repositorio.udl.edu.pe Fuente de Internet | <1% |



SEBASTIAN HUANGAL SCHEINER
DNI: 16796563
ASESOR

| | | |
|----|---|------|
| 9 | digibug.ugr.es Fuente de Internet | <1 % |
| 10 | repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 11 | worldwidescience.org Fuente de Internet | <1 % |
| 12 | es.scribd.com Fuente de Internet | <1 % |
| 13 | Verink, E. D.. "Simplified Procedure for Constructing Pourbaix Diagrams", Uhlig's Corrosion Handbook Review/Corrosion Handbook 3E, 2011. Publicación | <1 % |
| 14 | docplayer.es Fuente de Internet | <1 % |
| 15 | spanish.iic.int Fuente de Internet | <1 % |
| 16 | www.fll.jku.at Fuente de Internet | <1 % |
| 17 | Submitted to Universidad Autónoma de Nuevo León Trabajo del estudiante | <1 % |
| 18 | accedacris.ulpgc.es Fuente de Internet | <1 % |



SEBASTIAN HUANGAL SCHEINER
DNI: 16796563
ASESOR

| | | |
|----|--|------|
| 19 | diposit.ub.edu Fuente de Internet | <1 % |
| 20 | repositorio.untrm.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 21 | repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet | <1 % |
| 22 | www.invemar.org.co Fuente de Internet | <1 % |
| 23 | natura.org.co Fuente de Internet | <1 % |
| 24 | Submitted to Universidad de Costa Rica Trabajo del estudiante | <1 % |
| 25 | Umair Ali Toor, Thu Thuy Duong, Seong-Yun Ko, Fida Hussain, Sang-Eun Oh. "Optimization of Fenton process for removing TOC and color from swine wastewater using response surface method (RSM)", Journal of Environmental Management, 2021 Publicación | <1 % |
| 26 | www.juarez.gob.mx Fuente de Internet | <1 % |
| 27 | Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante | <1 % |
| 28 | archive.org Fuente de Internet | <1 % |



.....
SEBASTIAN HUANGAL SCHEINER
DNI: 16796563
ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

| | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Autor de la entrega: | Javier Medina |
| Título del ejercicio: | Sistema electro-Fenton |
| Título de la entrega: | Sistema electro-Fenton |
| Nombre del archivo: | TESIS_DOCTORAL_ELECTROFEN... |
| Tamaño del archivo: | 7.45M |
| Total páginas: | 116 |
| Total de palabras: | 22,171 |
| Total de caracteres: | 118,127 |
| Fecha de entrega: | 27-ene-2021 04:51 p.m. (UTC-0500) |
| Identificador de la entrega: | 1495560155 |



Derechos de autor 2021 Turnitin. Todos los derechos reservados.

SEBASTIAN HUANGAL SCHEINER
DNI: 16796563
ASESOR