

# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA**

**(Creada por Ley Nro. 29531)**



## **INFORME FINAL DE INVESTIGACION**

**APLICACIÓN DEL PROCESO FENTON PARA DEGRADAR AGUAS  
RESIDUALES DEL CAMAL DE CHOTA**

### **DOCENTES INVESTIGADORES**

Responsable: M.sc. Ing° Carlos Javier Medina Valderrama

Miembros : Ing° Wilmer Uriarte Tirado

Blg. Salvador Tomas Orrego Zapo

Msc. Ing° Edgar Michel Montero del Águila

CHOTA, abril del 2018

## ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCION	5
CAPITULO I	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA	8
1.2.- FORMULACION DEL PROBLEMA	12
1.2.1.- PROBLEMA GENERAL	12
1.2.2.- PROBLEMAS ESPECIFICOS	12
1.3.- OBJETIVOS	12
1.3.1.- OBJETIVO GENERAL	12
1.3.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS	12
1.4.- JUSTIFICACION	13
CAPITULO II	15
MARCO TEÓRICO	15
2.1.- ANTECEDENTES	15
2.2.- Bases Teóricas	26
2.2.1.- Procesos avanzados de oxidación	26
2.2.2.- Especies Químicas que generan el reactivo de Fenton	28
EL PROCESO FENTON	29
2.2.3.- Generación de aguas residuales	36
2.3. BASES CONCEPTUALES	37
2.4.- HIPÓTESIS	39
2.4.1.- Hipótesis general	39
2.4.2.- Hipótesis específica	39
2.5.- IDENTIFICACION Y DEFINICION OPERATIVA DE VARIABLES	39
2.5.1.- Variable dependiente: Degradación de aguas residuales	39
2.5.2.- Variable independiente: Proceso Fenton.	41
2.6.- ALCANCES Y LIMITACIONES	43
CAPÍTULO III	45
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	45
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	45
3.3. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	45
3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	45
3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA	51
3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	51
3.7. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	56
3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DEL RESULTADO	56
3.9.- AMBITO DE ESTUDIO	57
CAPITULO IV	58
RESULTADOS	58
4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	58
4.2.- DISCUSION	76
CONCLUSIONES	90
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	94
ANEXOS	98

## RESUMEN

El objetivo fue optimizar la aplicación del proceso Fenton para degradar las aguas residuales del camal municipal de Chota - Perú, que contienen alta carga orgánica y son un peligro constante de contaminación de cuerpos de agua y suelo. Los parámetros evaluados fueron: DBO<sub>5</sub>, DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez, temperatura, potencial oxido-reducción, oxígeno disuelto y análisis microbiológicos para la presencia de Salmonella y E. Coli. Se utilizó un sistema de jarras con agitación a 30 rpm para tratar las muestras y diferentes concentraciones de FeSO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH de acuerdo al diseño Box – Behnken y optimización mediante la metodología de superficies de respuesta con el software Statgraphics 5.1 plus. Se encontró un tiempo óptimo de reacción de 18 minutos y la concentración óptima de FeSO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y pH fueron de 2110,55 mg/L, 1092,67 mg/L y 3,22 respectivamente. Se observó una mejora del indicador de biodegradabilidad a un valor de 0.5 y una remoción de la DQO alrededor del 80 %. El proceso Fenton resulta ser una alternativa eficaz para el tratamiento de aguas residuales de camales y puede ser aplicado como pre-tratamiento.

Palabras Clave: proceso Fenton, agua residual, sustancia recalcitrante.

## ABSTRACT

The objective was to optimize the application of the Fenton process to degrade the wastewater of the municipal canal of Chota - Peru, which contain high organic load and are a constant danger of contamination of bodies of water and soil. The parameters evaluated were: BOD<sub>5</sub>, COD, alkalinity, hardness, pH, conductivity, total solids, turbidity, temperature, oxidation-reduction potential, dissolved oxygen and microbiological analysis for the presence of Salmonella y E. Coli. A jar system with agitation at 30 rpm was used to treat the samples and different concentrations of FeSO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and pH according to the Box - Behnken design and optimization using the response surface methodology with the Statgraphics 5.1 plus software. An optimum reaction time of 18 minutes was found and the optimum concentration of FeSO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and pH were 2110.55 mg/L, 1092.67 mg/L and 3.22 respectively. An improvement of the biodegradability indicator was observed at a value of 0.5 and a removal of the COD around 80%. The Fenton process turns out to be an effective alternative for the treatment of sewage from canal and can be applied as pre-treatment.

Keywords: Fenton process, residual water, recalcitrant substance.

## INTRODUCCION

La presente investigación nace como preocupación a la falta de atención a las aguas residuales que se generan en el camal municipal de la provincia de Chota, que por su alto poder contaminante requieren un tratamiento adecuado para minimizar los riesgos de contaminación a las aguas de la quebrada Colpamayo que su vez es efluente del río Chotano. Las aguas residuales que se generan en el camal de Chota son fluidos con altos niveles de contaminación por sangre, heces, grasas, pelos, proteínas, etc. que se producen durante las operaciones de sacrificio y faenado de animales.

La norma básica que reconoce a los derechos ambientales en el Perú, es sin duda la Constitución Política, en cuyo artículo 2, inciso 22, Del capítulo I referido al derecho de las personas, dice textualmente lo siguiente: "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".

De lo expuesto, es la municipalidad provincial de Chota la encargada de proponer, gestionar y tratar apropiadamente las aguas residuales que se generan en el camal, es por ello que el presente trabajo se centra específicamente en buscar una alternativa de tratamiento, de fácil manejo y viable que contribuya a minimizar los riesgos de contaminación por las aguas residuales vertidas sobre las aguas de la quebrada Colpamayo. La alternativa propuesta se fundamenta en un tratamiento químico efectivo, que favorece el impulso de procesos más sostenibles, y que se presenta como un procedimiento eficaz comparado con métodos convencionales.

La tecnología desarrollada es un proceso de oxidación avanzada, específicamente el proceso Fenton, que se basa en la reacción de sales ferrosas con peróxido de hidrógeno en medio ácido, cuya reacción genera in situ radicales  $\text{OH}^*$  altamente oxidante, capaz de degradar muchos compuestos orgánicos de forma no selectiva y con altas velocidades de reacción. Esta propiedad es aprovechada para conseguir la completa mineralización de los contaminantes o su degradación en sustancias más fácilmente biodegradables.

El estudio contempla pruebas experimentales a nivel de laboratorio para la adición de sulfato de hierro, peróxido de hidrógeno y pH a valores óptimos, la remoción de carga orgánica, evolución de la demanda química y bioquímica de oxígeno durante el proceso para la determinación de la mejora del indicador de degradabilidad.

El presente trabajo permite difundir el estado del arte y la facilidad de aplicación de una tecnología que se ha aplicado con resultados satisfactorios en otros países y que puede resultar beneficiosa para el tratamiento de las aguas residuales del camal de Chota, proponiendo una alternativa de tratamiento que la municipalidad puede tomar para dar solución al problema y así minimizar los riesgos de contaminación ambiental.

El trabajo de investigación se ha estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo I se presenta el planteamiento del problema, donde se realiza la caracterización, formulación del problema, objetivos y justificación.

En el capítulo II se muestra el marco teórico, donde se ha realizado la revisión bibliográfica respectiva, se plantea las bases teóricas que sustentan la investigación, las bases conceptuales, hipótesis, identificación y definición de indicadores de variables, alcances y limitaciones.

En el capítulo III se presenta la metodología de la investigación, tipo, nivel, método y diseño de la investigación, así como la población y muestra, técnicas, procedimientos e instrumentos para la recolección de datos y análisis y el ámbito de estudio.

En el capítulo IV se hace la presentación de los resultados, la prueba de hipótesis, análisis, interpretación y discusión de resultados.

Finalmente, se detalla las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas respectivamente.

## **CAPITULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

El camal municipal de Chota se encuentra ubicado en la zona urbana de la provincia de Chota en el departamento de Cajamarca, por la ruta de salida a la ciudad de Bambamarca (W: 78°38,705', S: 6°33,836'), la cual depende de la administración directa de la Municipalidad. En dicho camal se sacrifican animales vacunos, ovinos, caprinos y porcinos (ver anexo 01) para consumo de la población, para ello durante las operaciones, los animales antes de ser beneficiados son bañados para retirarles del cuerpo el polvo y las excretas. Una vez sacrificados, la sangre, desechos de limpieza de vísceras, pelos, grasas, proteínas y sustancias provenientes de la mucosa (Muñoz, 2005) que generan aguas contaminadas con alta carga orgánica que son descargadas directamente a las aguas de la quebrada Colpamayo, como se puede observar en la figura 1, lo que propicia la aparición de vectores, foco de infecciones, malos olores, impacto visual negativo y un desbalance en el nivel de amortiguamiento natural las aguas de la quebrada, impactando negativamente sobre éste y a lo largo de su recorrido, ya que dichas aguas confluyen hacia el río Chotano, lo que podría generar un serio riesgo a la salud a las familias que viven en las cercanías y de aquellas que hagan uso de las aguas de la quebrada Colpamayo aguas abajo ya que la exposición a contaminación biológica es continua.



Figura 1  
Contaminación de efluentes generados por el camal de Chota  
en las aguas de la Quebrada Colpamayo - Chota



Una de las deficiencias en las operaciones que afronta el camal municipal de Chota es que no presta la debida atención a la generación de sus efluentes, que es muy probable que tengan concentraciones importantes de grasas y productos lignocelulósicos que pueden interferir en la aplicación de tratamientos biológicos (Muñoz, 2005). Sin embargo el problema se agudiza debido a que cuenta con un sistema de drenaje deficiente, con rejillas obsoletas que permiten el paso de residuos sólidos, incapaz de dar un tratamiento primario previo para verter sus efluentes a cuerpos de agua tal como lo establece la normativa ambiental vigente que estipula que dichos establecimientos deben contar con una declaración de

impacto ambiental así como un plan de manejo ambiental con la finalidad de que las operaciones y procesos que se desarrollen no generen perjuicio al entorno y puedan deteriorar la calidad de vida de la población.

Bajo las premisas expuestas, es la DESA – Chota el organismo competente en la provincia para vigilar que la salud pública no esté en riesgo latente por efluentes contaminados, sin embargo a la fecha se ha podido verificar que no hay ningún control en los efluentes vertidos por el camal de Chota, lo que supone que los niveles de contaminación son alarmantes, complejos y variables, que depende del tipo de animal sacrificado, grado de procesado, equipamiento y operaciones de limpieza, que observándolo desde el punto de vista ambiental ocupa un lugar relevante por los altos niveles de consumo de agua que se requieren durante el sacrificio y faenado. En la tabla 1 se muestran los parámetros máximos permisibles para la descarga de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado en el Perú.

Las operaciones de faenado en el camal de Chota genera grandes volúmenes de agua residual, aunque se desconoce los volúmenes empleados en dicho establecimiento se puede identificar con claridad las operaciones que generan aguas residuales con alta demanda química y biológica tal como se menciona en la tabla 2.

Tabla 1  
Valores máximos admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado

Parámetros	Unidad	Límite máximo permisible
Temperatura	°C	<35°C
pH	-	6.0 – 9.0
SST	mg/L	500
DBO <sub>5</sub>	mg/L	500
DQO	mg/L	1000
Grasas y aceites	mg/L	100
Nitrógeno amoniacal	mg/L	80

Recuperado de: D.S. 021-2009- vivienda - Perú

Tabla 2  
Identificación de generación de aguas residuales durante las operaciones de faenado en el camal de Chota

Operación	Desecho
Izado y Lavado	Agua residual con tierra, estiércol y orina
Degollado	Agua residual con sangre
Desollado	Agua residual con sangre
Eviscerado	Agua residual del lavado de vísceras
Corte y lavado de la canal	Agua residual con sangre
Lavado de pisos	Agua residual con sangre y detergente
Depilado, Chamusado	Agua residual con pelos
Elaboración propia	

Como ya se ha mencionado, las aguas residuales de camales por el alto contenido de grasa, aceites y material lignocelulósico, puede resultar inadecuado la utilización de métodos biológicos para su depuración por lo que el presente proyecto plantea la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación, que en los últimos años han dado resultados interesantes en el tratamiento de aguas. (García, 2007). Por tanto una alternativa eficaz, viable y a costos relativamente bajos que puede implementar la Municipalidad Provincial de Chota es la aplicación de un proceso avanzado de oxidación fundamentado en el proceso Fenton, que implica la reacción de sales de fierro con peróxido de hidrógeno en medio ácido, que genera radicales OH\* in situ con alto poder oxidante electivo, cuya efectividad y economía de aplicación estará sujeto a un

correcto control de pH, dosificación de reactivos y composición inicial y final del agua residual tratado.

## **1.2.- FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.2.1.- PROBLEMA GENERAL**

¿Cómo influye el sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH en la aplicación del proceso Fenton para degradar las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota?

### **1.2.2.- PROBLEMAS ESPECIFICOS**

- ¿Qué características fisicoquímicas tienen las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota?
- ¿Cuáles son las cantidades óptimas de sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH en la mejora del indicador de degradabilidad DBO/DQO de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota aplicando el proceso Fenton?
- ¿Cómo es la velocidad de degradación de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota cuando se aplica el proceso Fenton?

## **1.3.- OBJETIVOS**

### **1.3.1.- OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la influencia del sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH para la aplicación óptima del proceso Fenton en la degradación de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota.

### **1.3.2.- OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar las características fisicoquímicas de las aguas

residuales generadas en el camal de Chota para su clasificación de degradabilidad.

- Encontrar la cantidad de sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH óptimos para mejorar el indicador de degradabilidad DBO/DQO de las aguas residuales generadas en el camal de Chota mediante la aplicación del proceso Fenton.
- Calcular el orden de la cinética de reacción de las aguas residuales generadas en el camal de Chota en condiciones óptimas del proceso Fenton.

#### **1.4.- JUSTIFICACION**

Las razones que motivan y justifican la realización de la investigación son las siguientes:

##### **➤ Conveniencia**

El tratamiento de las aguas del camal de Chota es de responsabilidad de la Municipalidad Provincial de Chota, por lo que investigación conviene en gran medida a esta institución, ya que la contaminación por las aguas residuales generadas en dicho establecimiento constituye un riesgo potencial a la salud que requiere atención inmediata.

##### **➤ Relevancia social**

La aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de las aguas del camal de Chota, impacta favorablemente en los ecosistemas del lugar y por ende a las familias que habitan en las cercanías de la quebrada Colpamayo y a lo largo de su recorrido.

##### **➤ Implicaciones prácticas**

El proceso Fenton es una tecnología que ha sido estudiada en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos aromáticos, colorantes azoicos, hidrocarburos, fármacos, etc. a pequeña y media escala con buenos resultados. La aplicación de este proceso en el tratamiento de las aguas residuales del camal de Chota se muestra prometedor ya que el proceso Fenton es no selectivo y fuertemente oxidante, sin embargo la viabilidad depende de la política de adición de reactivos y control del proceso.

➤ **Valor teórico**

La aplicación del proceso Fenton para tratar las aguas residuales nos permite conocer la capacidad oxidante que posee este reactivo, y cómo se comporta frente a sustancias de índole biológica hacia la mineralización total o parcial de los contaminantes o su degradación en sustancias más fácilmente biodegradables.

➤ **Utilidad metodológica**

Los tratamientos biológicos son eficiente hasta cierto punto, ya que el alto contenido de grasas y aceites en las aguas residuales del camal de Chota son un impedimento significativo para tratarlos con eficiencia y rapidez, sin embargo; una de las tecnologías fisicoquímicas que puede ser una alternativa efectiva para la degradación de las aguas residuales es el proceso de oxidación Fenton que ha adquirido importancia en los últimos tiempos por su fácil aplicación, bajo costo de operación y efectividad, siendo la eventual solución al problema por la disminución significativa del riesgo de contaminación del subsuelo cuerpos de agua y sobre todo de la población.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.- ANTECEDENTES**

El agua constituye uno de los elementos primordiales para el normal desarrollo de la vida, luego que ésta ha sido utilizada por el hombre para el desarrollo de alguna actividad económica pierde sus estándares de calidad para usos posteriores, transformándose en una agua residual de la que es necesario controlar sus parámetros fisicoquímicos y biológicos para efectuar su vertido sobre cuerpos de agua o suelo. Por lo general las aguas residuales se miden por indicadores bacterianos de contaminación fecal, a la cual se asocian microorganismos patógenos, sin embargo; en mucho de los casos dicha relación no se cumple (González et.al., 2003), por lo que es conveniente efectuar análisis fisicoquímicos y biológicos constantes. Es de importancia de que el agua que tomamos de la naturaleza en condiciones aceptables, sea devuelto de la misma manera a ella, sin embargo la gran problemática de las aguas residuales es que en gran parte de éstas no son tratadas oportunamente y se regresan a la naturaleza con altos índices de contaminación, cambiando su química; lo que altera seriamente a los ecosistemas que depende de ella (Lahera, 2010), y dependiendo del grado de contaminación las aguas residuales pueden liberar compuestos volátiles, provocando malos olores y sabor acentuado que pueden ser un problema serio si se pretende efectuar una nueva operación de purificación y tratamiento, aunado a ello las aguas residuales resultan ser el medio ideal de colonización de protozoos que resultan ser excelente

vehículo de transmisión de la mayoría de parásitos, por lo que hay que tener mucho cuidado si estas aguas se dejan infiltrar al suelo, utilizadas para riego de áreas verdes y zonas agrícolas o de reuso industrial (Solarte et.al., 2006).

En la actualidad existen infinidad de tratamientos físicos, químicos y biológicos para mejorar la calidad de las aguas residuales, sin embargo muy pocas de ellas se han usado para tratar las aguas residuales generadas en los camales, de la que es muy bien conocida el grado de contaminación que poseen dependiendo del tipo de animal sacrificado, grado de procesado, equipamiento y protocolos de limpieza (Becerra et.al., 2014). La alta concentración de materia orgánica tanto disuelta como en suspensión de las aguas residuales de camales se debe principalmente a la presencia de proteínas, aminas, sustancias volátiles y ácidos orgánicos aunado a pelos, grasas, vísceras y material lignocelulósico, producto de la estabulación, sacrificio y faenado de los animales que de no tratarse adecuadamente es un foco preocupante de contaminación ambiental (Salas y Condorhuáman, 2008).

el desangrado es otro factor crítico que contribuye a la contaminación de las aguas residuales en un camal, por el alto poder contaminante que posee la sangre, con una  $DBO_5$  de más de 140 g/L, y que a pesar de que algunas plantas de faenado hacen esfuerzos por contener la sangre y contenidos de los estómagos e intestinos, estas aguas residuales pueden alcanzar valores en la  $DBO_5$  y DQO que oscilan entre 1000 a 6000 mg/L (ver tabla 3) dependiendo de la cantidad,



velocidad del faenado y estructuración de la planta. (CAPRE, ANDESAPA, OPS/CEPIS y GTZ, 1992).

Tabla 3  
Cargas contaminantes y cantidades de aguas residuales específicas en camales

Unidad de referencia	Carga de la DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Carga de la DQO (mg/L)	Volumen usado (L)
Sacrificio de una unidad de ganado mayor (una res 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

Recuperado de: CAPRE/ANDESAPA y sus miembros. Aguas residuales de mataderos y plantas procesadoras de carne (1992).

Como se puede observar, la generación de aguas residuales producto de la actividad en los camales se han convertido hoy en día en un problema que urge de una atención profunda sobre cuáles deben ser las verdaderas estrategias para encarar la gestión y tratamiento de dichas aguas, ya que una vez generadas es necesario minimizar los impactos que éstas pueden generar, es así que Quille y Donayre (2013) analizaron las aguas residuales de un camal municipal, reportando una DBO<sub>5</sub> de 854 mg/L y una DQO de 1758 mg/L, aplicaron un tratamiento químico mixto consistente en una lechada de cal – sulfato de aluminio, obteniendo una remoción sustancial de la DBO y la QDO de 75 % y 73 % respectivamente a un pH de 10.2. Concluyen que las aguas residuales del camal poseen altos niveles de carga orgánica, y que los residuos sólidos como el rumen, estiércol,

pelos, grasas de los animales constituyen un foco de infecciones y contaminación ambiental.

Por otro lado Becerra et.al., (2014) efectuaron estudios de caracterizaron a 6 camales y encontraron elevados los parámetros establecidos en la normativa peruana así como también presencia de microorganismos patógenos, y 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 parte de estos efluentes son destinados a riego de vegetales o consumo de animales por lo que se debe tener en cuenta la calidad para evitar contaminación por microorganismos. Concluyeron que el indicador de biodegradabilidad está por encima de 0.6 lo que permite inferir que la materia orgánica es biodegradable.

Otros estudios expresan que para el tratamiento de aguas residuales de camales, el método de Flotación por aire disuelto resulta ser el más eficiente para separar grasas, aceite y sangre coloidal. Las características del agua residual de camal que analizaron fueron: pH 7.2, DBO y DQO igual a 9300 mg/L y 4700 mg/L, grasas y aceites igual a 28 mg/L respectivamente. La Flotación con aire disuelto, permite remover la DBO y la DQO en un 80% y 75% respectivamente, recomendando que un recojo apropiado de la sangre y solidos del rumen significaría una gran ventaja para el tratamiento ya que disminuye considerablemente la contaminación, y que la sangre y desechos pueden dársele un valor agregado (Salas y Condorhuamán, 2008).

No cabe duda que las aguas residuales de los camales constituyen un serio problema ambiental, siendo indispensable buscar alternativas de tratamiento que permita minimizar los impactos al ambiente. Las tecnologías avanzadas de oxidación se han mostrado interesantes en estos últimos tiempos para el tratamiento de diferentes aguas residuales contaminadas, siendo el proceso Fenton uno de los más frecuentemente utilizada, dado que el mecanismo de reacción ha sido estudiado con detenimiento y propuesto por varios investigadores, siendo los iones  $Fe^{+2}$  el catalizador y peróxido de hidrógeno el agente oxidante, donde el pH, temperatura, dosificación de reactivos y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos determinan la eficiencia total de la reacción (Neyens y Baeyens, 2003, Sun et.al., 2014), pero la controversia por el mecanismo de la reacción Fenton es aun objeto de discusión entre investigadores (Barbusinski, 2009), sin embargo; la efectividad para degradar contaminantes aun en condición recalcitrante está demostrada, como los estudios de Martínez, et al. (2010) que aplicaron la reacción de Fenton en el tratamiento de aguas de lavado de aceite y aceitunas donde los efluentes generados representaron un problema ambiental por su alto contenido en materia orgánica, DQO igual a 3,5 g  $O_2/L$  en las aguas de lavado de aceitunas y 4,5 g  $O_2/L$  en las aguas de lavado de aceite. Utilizaron una planta piloto de 3 - 5  $m^3/h$  con reactor tipo tanque agitado para realizar las pruebas de funcionamiento y comprobación de resultados y la influencia de las condiciones ambientales (entre 1 °C a 7 °C durante la mañana). Probaron tres tipos de catalizador, perclorato de fierro, cloruro férrico

y sal de Mohr  $\text{Fe}(\text{SO})_4(\text{NH}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , concluyendo que el valor óptimo de peróxido de hidrógeno estuvo entre 5 % a 10 %, al utilizar una relación de Catalizador / peróxido igual a 0.05 (P/V), y las características del agua de salida fueron: pH 6,5 – 7,5; DQO entre 110 – 310 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ ; conductividad 2,4 – 3,8 mS/cm; fenoles totales 15 – 32,8 mg/L; concentración de Fe 1,13 – 2 mg/L y concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  de 10,7 – 20 mg/L.

El proceso Fenton también fue estudiado por Augustine et.al.,(2012) para tratar soluciones acuosas contaminadas con pesticidas clorpirifos, cypermetrin y chlorothalonil que dieron una DQO de 1130 mg/L, ajustaron el pH con ácido sulfúrico y añadieron la cantidad de fierro requerido en forma de sulfato heptahidratado junto con peróxido de hidrógeno bajo agitación. Concluyeron que la relación molar idónea fue de  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$  en 10, pH igual a 3 y temperatura en 40 °C. A estas condiciones la completa degradación de los pesticidas ocurre en un minuto y la biodegradabilidad aumenta desde cero a 0,35 en 60 minutos, con una remoción de DQO de 69,03 % recomendando al proceso Fenton como pre-tratamiento.

Por otro lado Nalinrut et.al., (2011) manifiestan que el proceso Fenton es capaz de aperturar anillos de compuestos aromáticos, incluidos colorantes, nitrofenoles, fenoles clorados, aminas aromáticas, aromáticos policíclicos, etc. hacia una mineralización del carbono orgánico a dióxido de carbono y agua. Prepararon agua residual sintética conteniendo 1 mM de o-toluidina en un reactor tipo batch agitado con un tiempo de 2 horas de reacción y ajustaron el pH inicial con ácido perclórico añadiendo enseguida una

determinada cantidad de sulfato ferroso con fuente de iones  $\text{Fe}^{+2}$  para luego adicionar peróxido de hidrógeno dentro e iniciar la reacción. Muestras fueron tomadas en intervalo de tiempos seleccionados e inyectados a un tubo que contiene solución de  $\text{NaOH}$  0,1 N para incrementar el pH y propiciar la finalización de la reacción. Las muestras fueron luego filtradas para remover el precipitado formado. Concluyeron que las condiciones óptimas fueron: pH de 3, 1 mM de ion ferroso, y 5 mM de peróxido de hidrógeno. También revelaron que la alta concentración de peróxido de hidrógeno puede mejorar la eficiencia de remoción de DQO a pH cercanos a 3, sin embargo a pHs superiores la eficiencia de remoción decrece.

Zazouli et.al.,(2012) estudiaron la aplicación del proceso Fenton en líquidos lixiviados de rellenos sanitarios, con una DQO de 3960 mg/L en promedio y señalan que las eficiencias de remoción incrementan cuando la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  aumenta por encima de la concentración óptima, sin embargo observaron que la concentración del  $\text{H}_2\text{O}_2$  fue una variable crítica en el proceso avanzado de oxidación y que a bajas concentraciones no se genera lo suficiente  $\text{OH}^*$  en la solución. Por otro lado, el incremento de la concentración de peróxido puede producir efectos opuestos sobre las reacciones producidas y que la concentración óptima sería la ideal para alcanzar un porcentaje máximo de remoción.

Así también Sundararaman et.al., (2009) establecen que el proceso Fenton no es aplicable a soluciones alcalinas, ya que a esas condiciones el ion  $\text{Fe}$  (II) comienza a precipitar y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  es también

inestable y puede descomponerse para dar oxígeno y agua y perder finalmente su habilidad oxidativa. Un pH entre 2 y 3 es el más efectivo para reacciones de degradación y que a una alta concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  hay una competición entre el substrato y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Una alta concentración  $\text{H}_2\text{O}_2$  actúa como limpiador del radical  $\text{OH}^*$  para producir el radical perhidroxil ( $\text{HO}_2^*$ ) el cual tiene mucho más baja capacidad con el Fenton clásico, y por encima de 85 % con los sistemas  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}/\text{UV}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}/\text{Sono}$  sin embargo; la evaluación de costos desde el punto de vista operacional sugieren hacer el proceso económicamente más viable ya que el reactivo Fenton muestra un rendimiento de remoción de color y DQO satisfactorio.

Entonces se puede afirmar que la oxidación Fenton presenta máxima actividad catalítica a pH 3,0. Un incremento o disminución en este valor de pH reduce bruscamente la eficacia. Para valores de pH > 3 - 4, el  $\text{Fe}^{+3}$  precipita como  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  y descompone el  $\text{H}_2\text{O}_2$  preferentemente en  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Además, la formación de complejos de Fe (II) a valores altos de pH conduce a la disminución de la concentración de  $\text{Fe}^{+2}$ . Por otro lado, para valores de pH más ácidos, la regeneración del  $\text{Fe}^{+2}$  por reacción del  $\text{Fe}^{+3}$  con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  se ve inhibida (Salas, 2010).

Guzmán et.al., (2016) evaluaron el pre-tratamiento de aguas residuales cítricas que son generadas durante la producción de jugos cítricos mediante el proceso foto-Fenton con luz solar, usaron una concentración de  $\text{Fe}^{+3}$  de 510 mg/L, y peróxido de hidrógeno en un intervalo de 50 % a 125 % establecida como un porcentaje de la

relación estequiométrica en peso entre el peróxido de hidrogeno y la DQO de 2.125. Sin embargo explican que la máxima degradación de compuestos orgánicos incrementa hasta la concentración critica del peróxido de hidrogeno en las que obtuvo una remoción entre 71 % a 125 % del valor estequiométrico, lo que supone la alta producción de radicales  $\text{OH}^*$ , pero se tiene que tener cuidado en el efecto residual del peróxido de hidrogeno. Concluyen que el proceso fenton asistido con luz solar es muy prometedora como técnica industrial de tratamiento con un costo aproximado de 13.8 euros por metro cubico.

Estudios recientes sobre la aplicación del proceso Fenton en aguas residuales advierten la efectividad e interés que ha adquirido este proceso fisicoquímico, siendo el mayor impacto del proceso Fenton homogéneo la cantidad de lodos después del tratamiento los que contienen iones metálicos debido a la precipitación de hidróxidos férricos cuya reducción puede lograrse con la adecuada dosificación de catalizador, así también la alta temperatura que pudiera requerir la oxidación y el barrido de radicales hidroxilo por el peróxido de hidrogeno son otros factores también a tener en cuenta. En contraste con el Fenton heterogéneo, el alto impacto deriva desde la disposición de los sólidos residuales pero estas están remarcadas en cantidades bajas de iones metales contenidos en los lodos, requiere condiciones de temperaturas más bajas pero el consumo de peróxido de hidrógeno es cuatro veces más que en el Fenton homogéneo. Sin embargo en la actualidad se están desarrollando procedimientos para superar estas limitaciones, obteniendo

excelentes resultados y perfilándose como un método de uso potencial para el tratamiento de aguas residuales (Rodríguez, 2016; Brillas y Martínez-Huitle 2015; Antonin et.al., 2015; Fontmorin y Sillanpaa, 2015; Zazou et.al., 2015)

Otro factor a tener en cuenta en el tratamiento de aguas residuales es la velocidad con que se degradan los contaminantes, es así que una agua residual puede estar compuesta por un sustrato único o por varios componentes cuya eliminación de contaminantes pueden ser removidas simultáneamente pudiendo estar condicionadas por una ley cinética de orden cero incluso a bajas concentraciones. (Ronzano y Dapena, 1995, Eckenfelder, 2001). Sin embargo hay que tener en cuenta que en la cinética de orden cero la velocidad es independiente de la concentración y puede presentarse en dos situaciones: Cuando la velocidad es intrínsecamente independiente de la concentración y cuando la especie es de tal manera abundante que su concentración es prácticamente constante durante la reacción, es decir la concentración de la especie aún es alta y se obtiene como resultado una cinética aparente de orden cero (Smith, 1991). Otras investigaciones expresan que un sistema que involucra varias sustancias contaminantes representa una cinética compleja donde los órdenes parciales son solo indicadores del efecto promedio de las concentraciones de cada especie sobre las velocidades de reacción y por lo tanto no permiten extraer conclusiones categóricas desde un punto de vista mecanístico (Nichela, 2012).



Como se puede apreciar, aún existen posiciones distintas entre investigadores, es por ello que complejidad de las reacciones Fenton hace que los mecanismos de reacción y en esencia la química Fenton sea aún objeto de controversia (Barbusinski, 2009), sin embargo en la aplicación del proceso Fenton para la oxidación de compuestos orgánicos se deben ajustar adecuadamente las condiciones de reacción con el objeto de que sean probablemente dos los mecanismos los que funcionen: abstracción de hidrógeno y adición radicalaria (Sánchez, 2007), e iniciar reacciones radicales en cadena (Barbusinski, 2009).

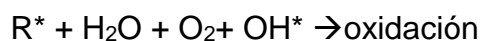
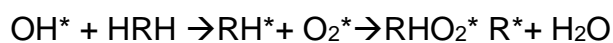
En el presente informe se han considerado tres factores de importancia para que el proceso Fenton degrade aceptablemente los contaminantes de las aguas residuales del camal de Chota: Concentración de sulfato ferroso, concentración de peróxido de hidrógeno y pH. Varios investigadores consideran que para que el proceso Fenton resulte eficaz debe cuidarse apropiadamente los factores mencionados. (Méndez et. al., 2010, Barquín et al., 2011, Primo, 2008). Cabe mencionar que la temperatura y agitación se simplificaron ya que el estudio se realizó a temperatura ambiente y según Sánchez (2007), al proceso Fenton se le aprecia un efecto más pronunciado a temperaturas alrededor de 20 °C, y esta es la temperatura promedio que se tiene en nuestro medio. En cuanto a la agitación no representa un efecto relevante en procesos Fenton de tipo homogéneo ya que el catalizador de fierro no se encuentra en suspensión (Primo, 2008).

## 2.2.- BASES TEÓRICAS

### 2.2.1.- Procesos avanzados de oxidación

Los procesos de oxidación avanzada (POAs) o, también llamados tecnologías de oxidación avanzada (TOAs) son un grupo selecto de procesos de alta eficacia para degradar contaminantes de naturaleza biodegradable y no biodegradable. Estos procesos se basan en la generación *in situ* de especies químicas con un gran poder de oxidación como son los radicales hidroxilo (OH<sup>\*</sup>), una especie química de carácter no selectivo y con un elevado potencial de oxidación capaz de reaccionar rápidamente con muchos compuestos orgánicos cuya participación en la disolución puede llevarse a cabo por medio de 5 mecanismos diferentes (Legrini et al., 1993 como citó Gilpavas et.al., 2011):

La abstracción de hidrógeno, referida a la interacción de los radicales hidroxilo (OH<sup>\*</sup>) con los compuestos orgánicos (HRH), que produce el radical (RH<sup>\*</sup>) al eliminarle el hidrógeno; este radical reacciona rápidamente con el oxígeno disuelto formando un peroxoradical orgánico (RHO<sub>2</sub><sup>\*</sup>), altamente inestable. Con esto se da paso a las reacciones de oxidación térmica que liberan al radical R, éste reacciona con el oxígeno y radicales OH<sup>\*</sup> libres en disolución, oxidándose así el radical orgánico:



La finalidad de la aplicación de los procesos de oxidación avanzada es lograr la:

- Mineralización de los contaminantes, hasta su completa transformación en dióxido de carbono, agua y aniones inorgánicos, evitando la formación de subproductos o residuos (procesos de carácter destructivo).
- Degradación de contaminantes orgánicos en compuestos más biodegradables y menos tóxicos (pre-tratamiento antes de un proceso biológico).
- Eliminación de color y olor
- Desinfección.

La tabla 4 muestra una lista de los potenciales de oxidación en medio ácido de los principales oxidantes químicos, se aprecia el elevado poder de oxidación que poseen los radicales  $\text{OH}^*$ , que se ubica por debajo del flúor con 2,8 V.

Tabla 4  
Potenciales de Oxidación estándar frente al electrodo de hidrógeno de algunos oxidantes químicos en medio ácido a 25°C

OXIDANTE	E°(V)
Fluoruro ( $\text{F}^-$ )	3,03
Radical hidroxilo ( $\text{OH}^*$ )	2,80
Oxígeno atómico ( $\text{O}_2$ )	2,42
Ozono ( $\text{O}_3$ )	2,07
Peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )	1,77
Permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ )	1,67
Ácido hipobromoso ( $\text{HBrO}$ )	1,59
Dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ )	1,50
Acido hipocloroso ( $\text{HClO}$ )	1,49
Cloro ( $\text{Cl}_2$ )	1,36
Bromo ( $\text{Br}_2$ )	1,09

Recuperado de: Primo, 2008

## 2.2.2.- Especies Químicas que generan el reactivo de Fenton

### ➤ Hierro

El Hierro es un metal que tiene dos estados de oxidación:  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ . Las sales ferrosas ( $\text{Fe}^{+2}$ ) cristalizadas son de color verde y en forma anhidra son de color blanco o amarillo pálido. Las sales férricas ( $\text{Fe}^{+3}$ ) cristalizadas son de color amarillo a causa de las especies  $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , sin embargo el color puede cambiar por la facilidad de formar complejos orgánicos. La especie  $\text{Fe}^{+3}$  es un catión más ácido que la especie  $\text{Fe}^{+2}$  por lo que es más estable en un medio acuoso ácido, pero estas especies no son las únicas ya que existen  $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{+4}$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  con una concentración importante en medios alcalinos que pueden precipitar como sales básicas de color pardo rojizo.

### ➤ Peróxido de Hidrógeno

Líquido incoloro con punto de ebullición a  $150,2\text{ }^\circ\text{C}$ , con una densidad relativa de  $1,45\text{ g/mL}$  a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , cuya estabilidad depende del pH y de la temperatura, pHs menores de 9 el peróxido es relativamente estable en un intervalo de temperatura de  $10\text{ }^\circ\text{C}$  a  $50\text{ }^\circ\text{C}$  para períodos menores a 96 horas y a pHs mayores a 9, existe una marcada descomposición a períodos mayores a 96 horas (Qiang et al. 2002 como citó Chávez 2006).

## EL PROCESO FENTON

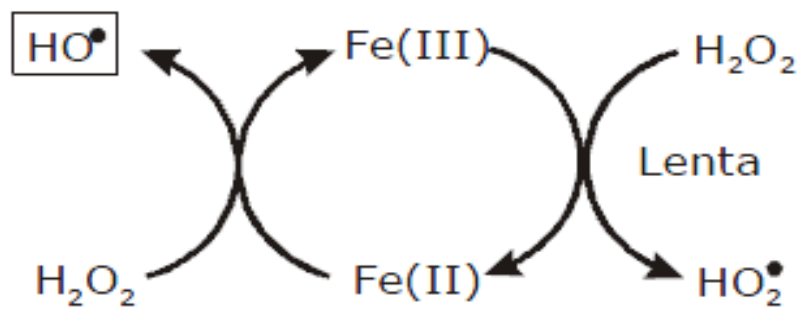
H. J. H. Fenton descubrió hace más de un siglo la posibilidad de la oxidación de muchas moléculas orgánicas en solución acuosa, mediante la adición simultánea de un catalizador de hierro soluble en agua y peróxido de hidrógeno. La oxidación se desarrolla con facilidad a rangos ácidos de pH, sin recurrir a altas presiones, temperaturas y equipamiento sofisticado. El mecanismo de la reacción de Fenton se soporta en varias teorías en la que están involucrados un gran número de intermediarios y reacciones elementales, las que han suscitado diversas posiciones y controversias entre investigadores, sin embargo lo que si se conoce con certeza es que el responsable de los procesos oxidativos es el radical hoxidrilo  $\text{OH}^*$ , que es extremadamente reactivo, y que en este caso es formado por la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno en medio ácido. El proceso Fenton tiene la capacidad de provocar:

- Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que facilitan un eventual proceso biológico posterior.
- Una oxidación parcial que se manifiesta en una disminución de la toxicidad del efluente.
- Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que pueden ser descargados en efluentes sin ningún tratamiento posterior.

La figura 2 muestra Un enfoque resumido sobre el comportamiento del hierro como catalizador y sus

interacciones con el peróxido de hidrógeno, el hierro cicla entre sus dos estados ferroso y férrico. La primera de las etapas genera los radicales hidroxilos  $\text{OH}^*$ , que son los de mayor poder oxidante y los deseados para la degradación de contaminantes, dichos radicales son atrapados en parte por el  $\text{Fe}(\text{II})$  y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Ortiz, 2009).

Figura 2  
Ciclo del hierro como catalizador en la reacción de Fenton



Recuperado de: Ortiz (2009)

La clasificación de los POAs está en función de la fuente de generación de la especie oxidante, es decir, el método para generar radicales hidroxilo. La figura 3, resume los principales POAs, entre ellos: procesos fotolíticos, fotocatalíticos, basados en el empleo de ozono, de peróxido de hidrógeno, oxidación bajo condiciones severas, electroquímico o mediante ultrasonidos.

Las reacciones que se suscitan dentro del proceso Fenton pueden estudiarse de acuerdo a las ecuaciones planteadas en la tabla 4 (Martínez, et al., 2010), cuyo propósito es la

formación de radicales OH\*, especie química que degrada los contaminantes según la reacción:

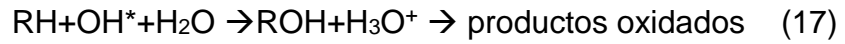
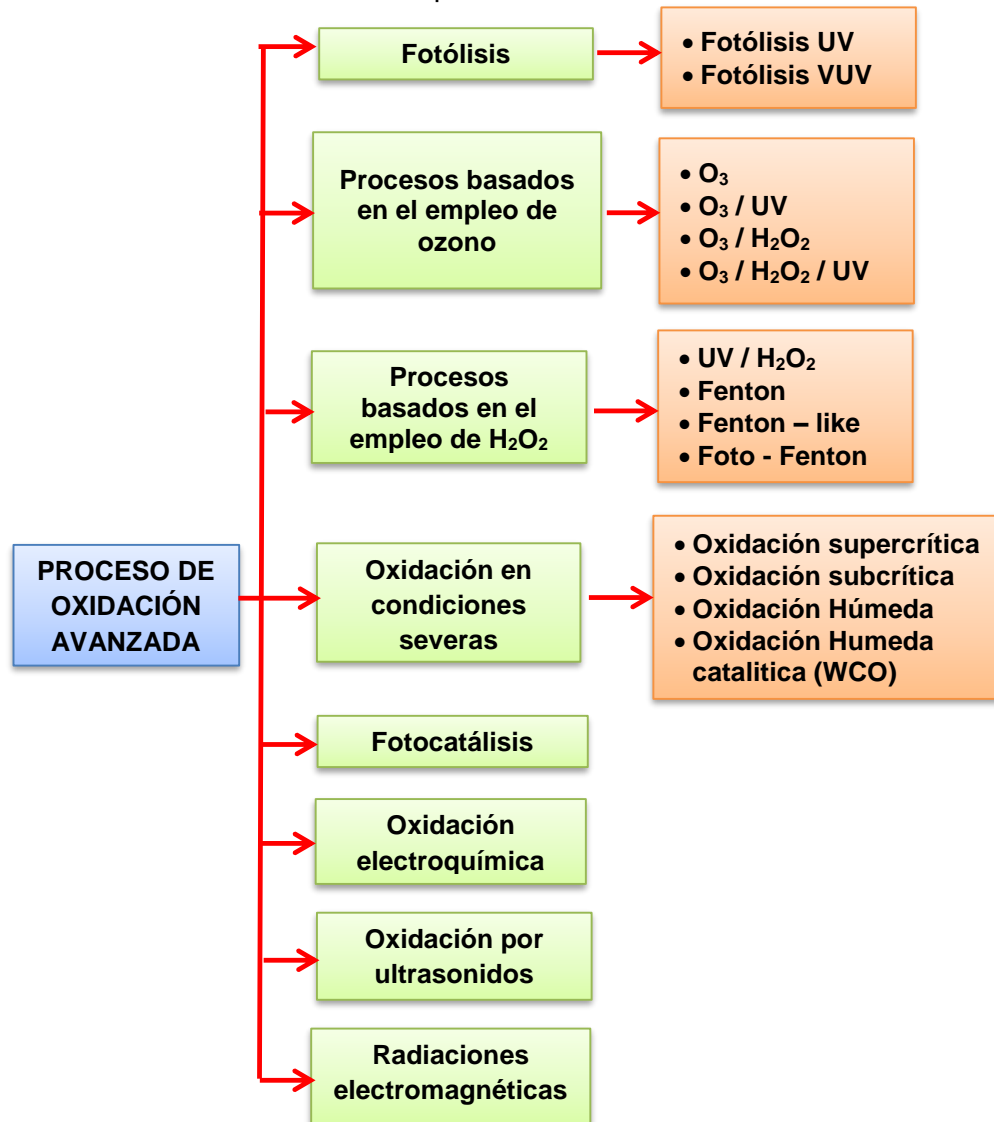


Figura 3  
Clasificación de los procesos de oxidación avanzada



Recuperado de: Primo (2008)

El posible mecanismo de la reacción parte de la reacción entre el Fe<sup>+2</sup> y el peróxido de hidrógeno en condiciones ácidas, produciéndose la oxidación del Fe<sup>+2</sup> a Fe<sup>+3</sup> originándose la

formación de radicales OH\* (ecuación 1) la que ocurre en forma espontánea y en ausencia de luz.

Tabla 5  
Algunas de las posibles reacciones involucradas en el proceso Fenton

$Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+3} + OH^- + OH^*$	(1)
$Fe^{+2} + OH^* \rightarrow Fe^{+3} + OH^-$	(2)
$Fe^{+2} + HO_2^* \rightarrow Fe^{+3} + OH_2^-$	(3)
$Fe^{+3} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+2} + OH_2^* + H^+$	(4)
$Fe^{+3} + HO_2^* \rightarrow Fe^{+2} + O_2 + H^+$	(5)
$Fe^{+3} + O_2^{\cdot-} \rightarrow Fe^{+2} + O_2$	(6)
$OH^* + H_2O_2 \rightarrow H_2O + HO_2^*$	(7)
$2OH^* \rightarrow H_2O_2$	(8)
$2HO_2^* \rightarrow H_2O_2 + O_2$	(9)
$HO_2^* + OH^* \rightarrow H_2O + O_2$	(10)
$H_2O_2 \leftrightarrow OH_2^- + H^+$	(11)
$Fe^{+3} + H_2O_2 \leftrightarrow [Fe(OH_2)]^{+2} + H^+$	(12)
$[Fe(OH_2)]^{+2} + H_2O_2 \leftrightarrow [Fe(OH)(HO_2)]^+ + H^+$	(13)
$OH_2^* \leftrightarrow O_2^{\cdot-} + H^+$	(14)
$OH^* \leftrightarrow O^{\cdot-} + H^+$	(15)
$HO_2^* + H^+ \leftrightarrow H_2O_2^{*+}$	(16)

Recuperado de: Martínez (2010)

Pero la reacción no puede ser explicada en base a la ecuación (1), estudios posteriores han mostrado que a un valor de pH adecuado, la reducción del  $Fe^{+3}$  a  $Fe^{+2}$  es posible, según las ecuaciones 4, 5 y 6. (García, 2007). Otras reacciones del proceso Fenton a tener en cuenta son las reacciones improductivas que ocurren al reaccionar los radicales hidroxilos con iones ferrosos, peróxido de hidrógeno o con los mismos radicales OH\* (ecuaciones 2, 7, 8 y 9). Sin embargo otras reacciones permiten la regeneración del  $Fe^{+2}$ , que

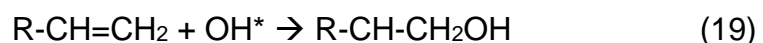


pueden tomar parte en la ecuación 1 y así generar nuevos radicales hidroxilo, pero estas reacciones ocurren a una velocidad bastante más lenta, ya que los iones de  $\text{Fe}^{+3}$  se van acumulando mientras que los iones de  $\text{Fe}^{+2}$  son consumidos hasta que la reacción se detiene.

El mecanismo de degradación de las diferentes sustancias orgánicas puede tomar cuatro vías:

- La abstracción del hidrógeno de átomos de carbono alifáticos.
- Adición electrofílica a enlaces dobles o anillos aromáticos.
- Reacciones de transferencia de electrones.
- Interacción radicalaria entre radicales  $\text{OH}^*$  u otro diferente para formar productos estables.

Estas reacciones se establecen a continuación:



Cabe mencionar que en el caso de los anillos aromáticos lo primero que llega a pasar es la hidroxilación del anillo para después romper los enlaces durante el proceso oxidativo.

La aplicación del proceso proceso Fenton conlleva al control de parámetros críticos para un correcto funcionamiento, tal como:

- ✓ **Tipo de catalizador y concentración**

Las sales de hierro producen descomposición del peróxido de hidrógeno y pueden consumir radicales hidroxilo, por lo que hay que procurar no dosificar exceso de catalizador ya que puede perjudicar la reacción de oxidación. El  $\text{Fe}^{+3}$  también se puede utilizar como catalizador, aunque su eficacia es inferior a la del  $\text{Fe}^{+2}$ . El catalizador se suele dosificar previamente al agua oxigenada, procurando su total disolución. (Martínez et.al., 2010)

✓ **Concentración relativa de reactivos y contaminante**

Un exceso de catalizador como un exceso de peróxido de hidrógeno puede ser contraproducentes porque en ambos casos se favorecen las reacciones improductivas. La concentración óptima de  $\text{H}_2\text{O}_2$  depende de la naturaleza y concentración de la materia orgánica a tratar, así como de la concentración de hierro presente en la reacción. Las relaciones molares óptimas de  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}$  de entre 10 y 25 han sido propuestas por varios autores cuando se lleva el proceso en fase homogénea (Nalinrut et.al., 2011, Barquín et.al., 2011, Augustine et.al., 2012)

✓ **Dosificación**

La relación peróxido/Fe/contaminante puede ser mantenida por adición intermitente del oxidante o fijada al inicio de la reacción. El peróxido de hidrógeno dosificado en forma gradual puede favorecer la oxidación del contaminante porque se minimizan las reacciones improductivas entre la especie hidroxilo (oxidante del contaminante) y el peróxido de

hidrógeno, así mismo se controla la oxidación rápida de  $\text{Fe}^{+2}$  a  $\text{Fe}^{+3}$  favoreciendo la velocidad de reacción. Se recomienda adicionar los reactivos al principio pueden ser distribuidos a lo largo del tiempo de reacción. (Rivas et.al. 2003)

✓ **pH**

El sistema Fenton depende del pH del medio de reacción, por tanto la velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH cercano a 3. Un pH inferior desacelera la reacción ya que es más estable el ión férrico y puede descomponerse el peróxido de hidrógeno, mientras que a valores de pH superiores puede precipitar hidróxido férrico y también puede descomponerse el reactivo peróxido (Salas, 2010)

✓ **Temperatura**

La reacción de oxidación Fenton es exotérmica. La velocidad de oxidación aumenta con el incremento de la temperatura. A presión atmosférica las temperaturas de operación no deben sobrepasar los  $40^{\circ}\text{C}$  ya que por encima de dicho valor se inicia la descomposición del peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua.

✓ **Agitación**

En procesos heterogéneos es evidente que si el catalizador está en suspensión la agitación es primordial. En cambio en procesos homogéneos como el Fenton o foto - Fenton no es tan evidente el efecto de la agitación. Sin embargo, como en la oxidación total se produce  $\text{CO}_2$  una buena agitación

favorece que se pueda desprender y también que el medio de reacción en contacto con el aire se oxigene mejor.

Cabe mencionar que las principales ventajas de la reacción Fenton es que las sales de hierro son abundantes y no tóxicas, el peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno, no hay formación de compuestos clorados como en técnicas tradicionales como la cloración y no existen limitaciones de transferencia de masa al ser un sistema homogéneo. Al término de la reacción de oxidación se neutraliza el sistema formándose lodos de la materia oxidada y del catalizador de  $\text{Fe}^{+2}$  como hidróxido férrico que es necesario gestionarlo adecuadamente, siendo factible disponerlo en una área acondicionada para la deshidratación y secado de lodos y establecer su disposición final.

### **2.2.3.- Generación de aguas residuales**

El agua, una vez que ha sido utilizada por alguna actividad humana pierde sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, dependiendo del uso que se le dio llevará consigo sustancias extrañas en tales cantidades y características que impiden su reutilización o vertido si no se trata adecuadamente (Arellano, 2002). Las fuentes de generación de aguas residuales se pueden clasificar en (OEFA, 2014):

- Aguas residuales industriales.- son las que se generan de un proceso productivo, incluyendo la actividad minera, agrícola, agroindustrial, energética y otros.

- Aguas residuales domésticas.- son de origen residencial y comercial, contienen desechos fisiológicos entre otros provenientes de la actividad humana.
- Aguas residuales municipales.- son aquellas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas para ser admitidas en el alcantarillado.

Para determinar si una agua residual es de fácil degradación o contiene materia orgánica persistente, es necesario calcular la relación de la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno cuyo valor obtenido nos permite evaluar el tipo de agua residual a tratar (tabla 6).

Tabla 6  
Indicadores de la mejora de la biodegradabilidad en aguas residuales

Parámetro indicador	Evaluación
$DBO / DQO > 0,60$	Contenido orgánico fácilmente biodegradable
$DBO / DQO \approx 0,41 - 0,59$	Contenido orgánico parcialmente biodegradable
$DBO / DQO < 0,4$	Contenido orgánico persistente, no biodegradable

Recuperado de: Jurado (2009)

## 2.3. BASES CONCEPTUALES

### 2.3.1.- Agua residual

Es aquella agua en la que sus características originales se han modificado por el uso en alguna actividad antropogénica y que para su reuso se requiere recuperar la calidad de la misma mediante un tratamiento previo o en su defecto para ser vertidas en algún cuerpo o medio receptor (OEFA, 2014).

### 2.3.2.- Biodegradabilidad

Se entiende como la degradación aerobia o anaerobia de un material por acción enzimática de microorganismos bajo condiciones normales del ambiente (Ruíz et.al. 2013). Las sustancias tienen la propiedad de reincorporarse con mayor facilidad a la tierra por acción de la naturaleza. Dependiendo de su composición física y química no todas las sustancias son biodegradables, ya que hay que tener en cuenta la estabilidad molecular y del medio en que se encuentran que lo hacen biodisponibles para los agentes biológicos.

#### **2.3.4.- Sustancia recalcitrante**

Son todas aquellas sustancias cuya degradación es más difícil y su persistencia en el ambiente es más larga, ya que en su composición química existen sustituyentes extraños, enlaces inusuales, anillos aromáticos muy condensados o el tamaño molecular grande por lo que su asimilación biológica es muy lenta y muchos de ellos tienen efectos acumulativos que puede ocasionar serios riesgos de contaminación.

#### **2.3.5.- Demanda química de oxígeno (DQO)**

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica e inorgánica cualquiera sea su origen. Se considera la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica a partir de un oxidante químico fuerte.

#### **2.3.6.- Demanda biológica de oxígeno (DBO)**

Es la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios. Hay variantes para el análisis de la DBO

dependiendo del período de incubación. La más frecuente es la determinación de DBO a los cinco días ( $DBO_5$ ).

## **2.4.- HIPÓTESIS**

### **2.4.1.- Hipótesis general**

La evaluación de la influencia del sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH para la aplicación del proceso Fenton permite optimizar la degradación de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota.

### **2.4.2.- Hipótesis específica**

- La caracterización de las aguas residuales del camal de Chota permite clasificar su degradabilidad.
- La adición de las cantidades óptimas de sulfato ferroso, peróxido de hidrógeno y pH del proceso Fenton mejora el indicador de degradabilidad DBQ/DQO de las aguas residuales generadas en el camal municipal de Chota.
- La cinética de eliminación de la DQO de las aguas residuales del camal de Chota mediante el proceso Fenton optimizado permite conocer el orden de la reacción.

## **2.5.- IDENTIFICACION Y DEFINICION OPERATIVA DE VARIABLES**

### **2.5.1.- Variable dependiente: Degradación de aguas residuales**

#### **➤ Demanda Biológica de oxígeno (DBO)**

#### **✓ Definición conceptual**

Cantidad de oxígeno requerido en la oxidación bioquímica de la materia orgánica a 20 °C y en oscuridad de una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Generalmente

se mide transcurridos cinco días de reacción ( $\text{DBO}_5$ ), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ).

✓ **Definición operacional**

Se toma un volumen definido de agua residual y se efectúa las diluciones correspondientes y se coloca en un frasco color ámbar para evitar la generación de reacciones fotosintéticas. Se verifica que el pH esté entre 6 a 8, luego se acondiciona un agitador magnético en su interior tapando la boca de la botella con un capuchón de goma evitando el ingreso de burbujas de aire y se colocan algunas gotas de hidróxido de potasio. Se cierra la botella con un sensor piezoeléctrico y se introduce en una estufa acondicionada a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Posteriormente se mide el oxígeno al cabo de 5 días.

➤ **Demanda Química de oxígeno (DQO)**

✓ **Definición conceptual**

Parámetro que expresa la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar las sustancias presentes en efluentes líquidos residuales por medio de un agente químico fuertemente oxidante. La DQO cuantifica la materia orgánica biodegradable por los microorganismos, como la materia orgánica no biodegradable y la materia inorgánica oxidable por ese agente químico. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ ).



✓ **Definición operacional**

Se toma una muestra de 2 mL de agua residual a analizar y se adiciona en un vial de DQO que contiene dicromato de potasio, sulfato de mercurio (II), sulfato de plata y ácido sulfúrico previamente agitado, se tapa y se vuelve a agitar para homogenizar el contenido en el vial. Se calienta en un termoreactor por 2 horas a 150 °C. Culminada la reacción se deja enfriar y se calcula la cantidad del dicromato sin reaccionar mediante un espectrofotómetro UV-Vis. La demanda química de oxígeno se calcula a partir de la absorbancia del cromo (VI) remanente en la solución medida en el espectrofotómetro.

**2.5.2.- Variable independiente: Proceso Fenton.**

➤ **Dosis de sulfato ferroso**

✓ **Definición conceptual**

El sulfato ferroso es un compuesto químico sólido verdoso o amarillento en cristales finos o granulados. Su fórmula es  $\text{FeSO}_4$ , forma una solución turbia soluble en agua y precipita al cabo de un tiempo, se oxida formando un recubrimiento marrón de sulfato férrico. Se emplea para purificación del agua por floculación y para eliminar fosfatos en plantas de depuración para prevenir la eutrofización.

✓ **Definición operacional**

A cada unidad experimental de agua residual previamente ajustada en el pH, se agrega el sulfato ferroso sólido,

agitando por espacio de 3 minutos para alcanzar la homogeneidad de la solución. La dosificación correcta de este compuesto es esencial ya que actúa como el catalizador del proceso Fenton, y un exceso generaría abundante lodos cuando se realice la neutralización.

➤ **Dosis de peróxido de hidrógeno**

✓ **Definición conceptual**

Compuesto químico líquido, incoloro, altamente polar y fuertemente enlazado con el hidrógeno. Es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un poderoso oxidante capaz de causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica o algunos metales. Su fórmula es  $H_2O_2$ , con densidad de  $1,45 \text{ g/cm}^3$ , punto de fusión  $-0,43 \text{ }^\circ\text{C}$  y de ebullición de  $150,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

✓ **Definición operacional**

El peróxido de hidrógeno al 30 % (w/w) es adicionado después de haber ajustado el pH y homogenizado el sulfato ferroso en cada unidad experimental. La adición se efectúa agitando para homogenizar con la muestra. Para eliminar el exceso de peróxido que queda sin reaccionar durante la toma de alícuotas para el análisis se utiliza el óxido de manganeso.

➤ **pH**

✓ **Definición conceptual**

Se define como el logaritmo de la recíproca de la concentración del ion hidrógeno (Sörensen, 1909 como citó Vogel, 1974) y se expresa:  $\text{pH} = -\text{Log}[H^+]$

$$\text{Además: } \text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (22)$$

Una solución es neutra si el  $\text{pH} = 7$ , ácida si  $\text{pH} < 7$  y es alcalina si el  $\text{pH} > 7$ .

### ✓ **Definición operacional**

Las muestras de agua residual fueron ajustadas a pH entre valores de 2,5 a 3,5 usando una solución de ácido sulfúrico 10 M. Esta variable es controlada durante todo el proceso de oxidación Fenton, correspondiente a cada unidad experimental, ya que es un parámetro condicionante para una mejor degradación del lixiviado. La tabla 7 resume la operacionalización de las variables de la investigación.

## **2.6.- ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **2.6.1.- Alcances**

La trascendencia del presente estudio radica en conocer la eficacia del reactivo de Fenton en el tratamiento de las aguas residuales generadas en el camal municipal de chota a través de la optimización del proceso que mediante un modelo matemático permite predecir la remoción de la DQO en función de los tres factores estudiados del proceso Fenton.

### **2.6.2.- Limitaciones**

El proceso Fenton ha sido probado con diversas contaminantes con características tóxicas dando muy buenos resultados de tratamiento, sin embargo; aún existe varias posiciones respecto al mecanismo de reacción y hasta discrepancias respecto a la generación del radical hidroxilo OH\* e interacciones, por lo que aun la química Fenton es objeto de discusión.

Tabla 7  
Operacionalización de las variables de la investigación

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	
<b>DEPENDIENTE</b> Degradación de aguas residuales	DBO	Cantidad de oxígeno usada en la oxidación bioquímica de la materia orgánica.	Serie de operaciones que mide la diferencia de oxígeno inicial y el oxígeno al cabo de 5 días.	mg O <sub>2</sub> /L
	DQO	Cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar las sustancias presentes en efluentes líquidos residuales, mediante un agente químico fuertemente oxidante	Se determina a partir de la diferencia entre el dicromato añadido inicialmente y el dicromato encontrado tras la oxidación.	mg O <sub>2</sub> /L
	FeSO <sub>4</sub>	Compuesto químico sólido verdoso o amarillento en cristales finos o granulados. Peso molecular de 151,9 g/mol y una densidad de 2,84 g/cm <sup>3</sup> , punto de fusión de 70 °C.	La dosificación correcta es esencial ya que actúa como el catalizador del proceso Fenton.	mg/L
<b>INDEPENDIENTE</b> Proceso Fenton	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Compuesto químico con características de un líquido incoloro altamente polar fuertemente enlazado con el hidrógeno, más viscoso que el agua. Es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor.	El H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 30 % (w/w) es adicionado después de haber ajustado el pH y homogenizado el sulfato ferroso en cada unidad experimental. La adición se efectúa poco a poco, agitando para homogenizar con la muestra, analizando permanente para garantizar la cantidad suficiente de este reactivo.	mg/L
	Ph	Logaritmo de la recíproca de la concentración del ion hidrógeno. Una solución es neutra si pH = 7, ácida si pH < 7, alcalina si el pH > 7, cuanto mayor es la concentración del ion hidrógeno, tanto menor será el pH de una solución.	Las muestras se ajustan a pH adecuado, usando una solución de ácido sulfúrico 2 N. Esta variable es controlada durante todo el proceso de oxidación Fenton, ya que es un parámetro condicionante para una mejor degradación del lixiviado.	0 - 14

Elaboración propia

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Es una investigación aplicada, depende del sustento de la investigación básica del reactivo de Fenton, busca la aplicación, utilización y consecuencias prácticas de tales conocimientos.

#### **3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN**

Es explicativa, ya que busca explicar cómo se relacionan las variables mediante causa – efecto.

#### **3.3. MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN**

El método empleado en la investigación es de carácter experimental hipotético - deductivo. Se estudian 3 factores de importancia del proceso Fenton: sulfato ferroso, peróxido de hidrogeno y pH. La Temperatura y agitación se simplificaron por las razones expuestas anteriormente (página 25). La figura 4 esquematiza en método de trabajo empleado.

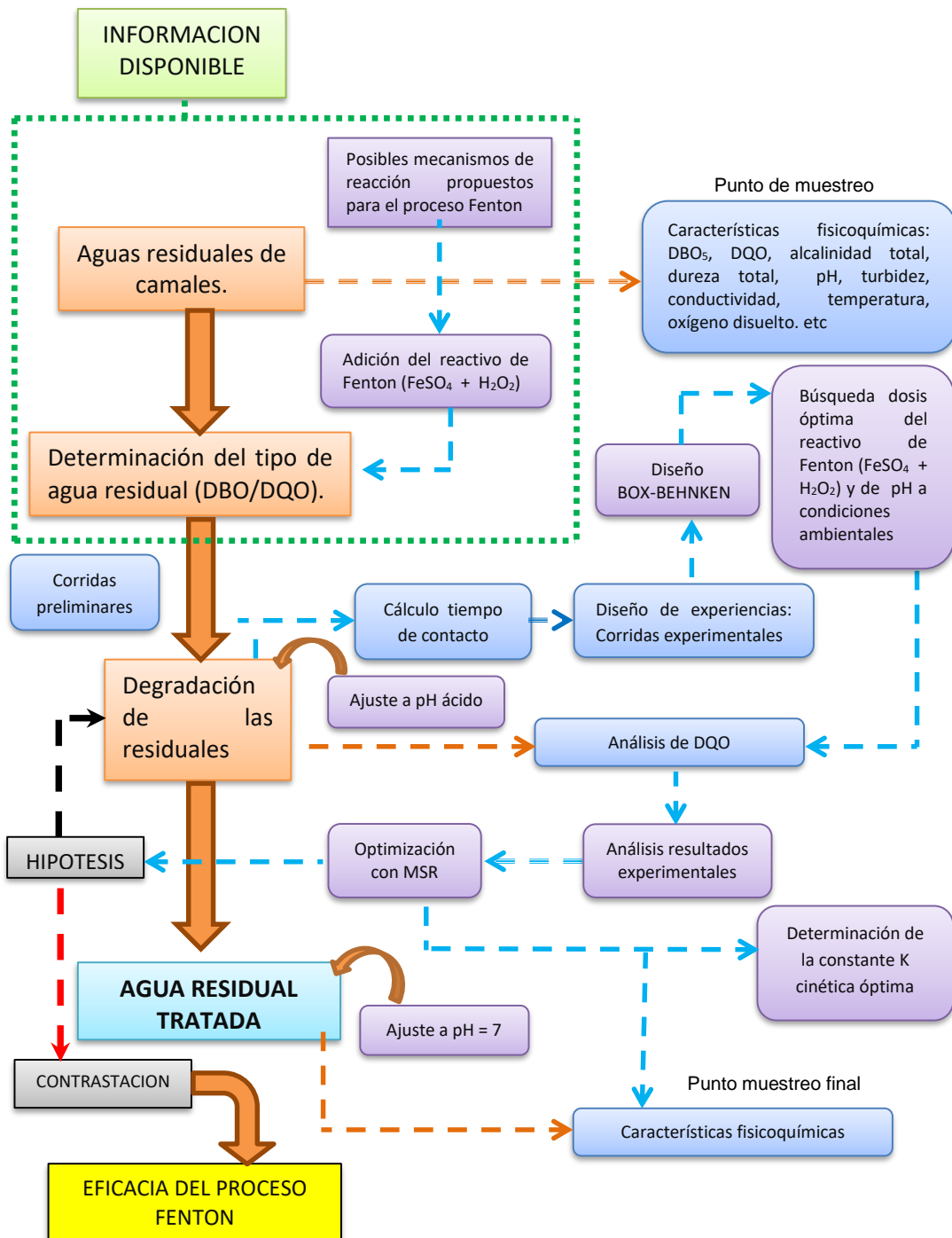
#### **3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

Es una experimentación verdadera, analítica y prospectiva.

##### **3.4.1.- Diseño Box – Behnken**

El Diseño Box–Behnken, es un modelo que se ajusta al comportamiento de 3 factores con 3 niveles de acuerdo a lo expuesto en el presente estudio, permitiendo obtener resultados significativos con la menor cantidad de ensayos realizados aleatoriamente. La variable de respuesta es la DQO removida.

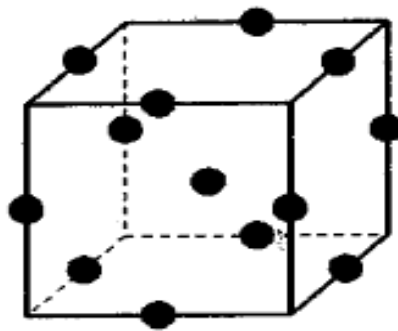
Figura 4  
Método a utilizar en la investigación



Elaboración propia

En el Diseño Box–Behnken las combinaciones de tratamientos se encuentran en los puntos medios de los bordes (1, 2, 3,...15) y en el centro del cubo (Central 1, Central 2, Central 3). Ésta matriz se resume de forma general en la figura 5.

Figura 5  
Estructura del diseño Box – Behnken con tres factores



La codificación y el plan de experimentación para el desarrollo de las pruebas del proceso Fenton se detalla en las tablas 8 y 9. La selección de los valores mínimo y máximo para el sulfato ferroso de 1500 – 2500 mg/L, peróxido de hidrogeno entre 800 – 1200 mg/L se hizo en base a estudios previos de la aplicación del proceso Fenton en matrices de aguas residuales (Barquín, et al.,2011, Escudero, 2012) donde sugieren que la concentración de  $H_2O_2$  debe ser alrededor de 1000 mg/L para tratar aguas contaminadas vía Fenton, pero se advierte que dosis altas de peróxido de hidrógeno puede producir abundante espuma y provocar la flotación de lodos. El rango de pH se determinó también en base a la literatura que afirma que el proceso Fenton se desarrolla mejor en valores de pH cercanos a 3.

Tabla 8  
Variables independientes, códigos y niveles utilizados en el plan de experimentación.

Variable independiente	Unidades	Símbolo	Código de Niveles		
			-	0	+
FeSO <sub>4</sub>	mg/L	X <sub>1</sub>	1250	1875	2500
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	mg/L	X <sub>2</sub>	800	1000	1200
pH	0 – 14	X <sub>3</sub>	2,5	3	3,5
VARIABLE DE RESPUESTA			DQO		

Tabla 9  
Matriz de experimentación para la aplicación del proceso Fenton mediante diseño Box Behnken

Experimento	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Plan experimentación		
				FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	pH
1	-	-	0	1250	800	3
2	-	+	0	1250	1200	3
3	+	-	0	2500	800	3
4	+	+	0	2500	1200	3
5	-	0	-	1250	1000	2,5
6	-	0	+	1250	1000	3,5
7	+	0	-	2500	1000	2,5
8	+	0	+	2500	1000	3,5
9	0	-	-	1875	800	2,5
10	0	-	+	1875	800	3,5
11	0	+	-	1875	1200	2,5
12	0	+	+	1875	1200	3,5
13	0	0	0	1875	1000	3
14	0	0	0	1875	1000	3
15	0	0	0	1875	1000	3

### 3.4.2.- Descripción del diseño del experimento

#### ➤ Obtención del agua residual

De la zona de desagüe de las aguas residuales del camal de Chota se tomaron muestras intermitentes por el lapso de una hora de acuerdo al volumen de agua que son vertidas a las aguas de la quebrada Colpamayo. Las muestras recolectadas fueron homogenizadas y se tomó una muestra representativa de 30 litros. La muestra fue colocada en



envases de plástico limpio y correctamente etiquetado para ser transportados al laboratorio, donde se determinan sus características fisicoquímicas.

➤ **Identificación del tipo de agua residual y ajuste del pH**

Para identificar el tipo de agua residual se calcula el valor de la relación  $DBO_5/DQO$  y se compara de acuerdo a la tabla 6, luego se ajusta el pH de las unidades experimentales a los valores establecidos de acuerdo a los niveles del plan de experimentación (tabla 9) con  $H_2SO_4$  10 M, evitando de esta manera la formación de hidróxidos de hierro que se precipitarían en el medio.

➤ **Cálculo del tiempo de contacto del agua residual con el reactivo de Fenton.**

Se tomaron dos muestras de 500 mL de agua residual en dos vasos de precipitación y se acidificó a pH a 3 con ácido sulfúrico, luego se adicionó el reactivo de Fenton al nivel bajo a la primera muestra y al nivel alto a la segunda en un sistema de prueba de jarras con agitación, tomándose muestras cada 5 minutos durante 1 hora, elevando el pH a 7 con hidróxido de sodio y adicionando 0.05 g de óxido de manganeso para eliminar el exceso de peróxido de hidrógeno a cada alícuota y proceder luego a la medición de la remoción de DQO y evaluar el tiempo óptimo adecuado para llevar a cabo el proceso de experimentación.

➤ **dosificación del reactivo de Fenton**

Calculado el tiempo óptimo de reacción para tratar las aguas residuales con el reactivo de Fenton, se acondicionan en un sistema de prueba de jarras con agitación las muestras respectivas con el pH previamente ajustado al plan de experimentación, se adiciona el catalizador necesario en cada unidad en forma de sulfato ferroso heptahidratado homogenizando el medio. Luego de 3 minutos se añade el peróxido de hidrógeno al 30 % V/V a cada unidad experimental. La reacción se lleva a cabo a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

➤ **Degradación de contaminantes en el agua residual**

La degradación de los contaminantes en el agua residual se lleva a cabo una vez iniciada agregados los reactivos de Fenton mediante la generación de los radicales  $\text{OH}^*$ . El tiempo de reacción es el óptimo calculado bajo agitación, luego se eleva el pH a 7 con NaOH 5 M. Las alícuotas de muestreo para análisis constan de 25 mL a la que se le añade 0.5 g de  $\text{MnO}_2$  se agita ligeramente hasta desaparición de burbujas, luego se filtra con papel de filtro de  $0,45 \mu\text{m}$ . Se preparan los viales de DQO identificada de acuerdo al experimento, se agitan y se agrega 2 mL del experimento realizado, se vuelve agitar para homogenizar, para finalmente colocarlos en el termo-reactor por un tiempo de 2 horas a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , finalmente se dejan enfriar los viales para luego efectuar las lecturas correspondientes en el

espectrofotómetro UV-VIS y calcular sus equivalentes en porcentajes de remoción de DQO.

### **3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.5.1.- Población**

Está determinada por todas las aguas residuales generadas dentro de las operaciones en el camal de Chota.

#### **3.5.2.- Tipo de muestreo**

Se aplicó un muestreo al azar, ya que todos los componentes de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidos para componer la muestra.

#### **3.5.3.- Muestra**

Se tomó directamente del punto de descarga de las aguas residuales del camal de Chota de manera aleatoria, se homogenizaron y se obtiene una muestra representativa.

### **3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

La tabla 10 presenta un resumen de los parámetros, técnicas e instrumentos utilizados en la presente investigación.

#### **3.6.1.- Descripción de las técnicas**

##### **➤ Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

Para estimar la DBO se usó la técnica respirométrica Oxi top que consta en una medición de presión en un sistema cerrado. Los microorganismos que se encuentran en la muestra diluida, consumen oxígeno y generan CO<sub>2</sub> la que es absorbida por las gotas de KOH al 45 % agregadas sobre el capuchón, creando una diferencia de presión que puede leerse directamente como valor de DBO en mg/L.

Tabla 10  
Técnicas e instrumentos de recolección de datos

VARIABLE	TIPO	PARÁMETRO	TECNICA	INSTRUMENTO
<b>Degradación de aguas residuales</b>	C	DBO	Incubación en frasco hermético a 20 °C por 5 días en oscuridad.	Botellas (Oxi top)
	C	DQO	Oxidación reflujo cerrado con dicromato de potasio en exceso en medio ácido y con catalizador que se determina fotométricamente a 620 nm.	Espectrofotómetro
	C	Dureza	Se toma una muestra y se adiciona indicador y luego se titula hacia un viraje de color.	Titulación
	C	Alcalinidad	Se toma una muestra, se agrega una solución buffer y se adiciona indicador y luego se titula hacia un viraje de color	Titulación
	C	pH	Determinación de la actividad de los iones hidrogeno por medidas potenciométricas	pHmetro
	C	Conductividad	Se toma una muestra y se introduce el electrodo calibrado y mide directamente el resultado.	Multiparamétrico
	C	Solidos totales	Se toma una muestra y se evapora a sequedad por diferencia de peso se obtiene los sólidos totales	Balanza analítica
	C	Oxígeno disuelto	Se toma una muestra y se introduce el electrodo calibrado y mide directamente el resultado.	Multiparamétrico
	C	turbidez	Comparación de la intensidad de la luz dispersada en condiciones definidas.	Turbidímetro
	C	ORP	Se toma una muestra y se introduce el electrodo calibrado y mide directamente el resultado.	Multiparamétrico

*Elaboración propia*  
C = cuantitativo

Los frascos deben ser de color ámbar con cerrado hermético para evitar la fotosíntesis y son incubados a 20 °C, pasado los 5 días de análisis se efectúa las lecturas teniendo en cuenta los factores de dilución (APHA, 1992).

### ➤ **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La técnica se basa en el reflujo cerrado en sistema vial de DQO, donde las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra se oxidan, actuando como oxidante fuerte el dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) en

medio ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en presencia de sulfato de plata ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercúrico ( $\text{HgSO}_4$ ) adicionado para remover la interferencia de los cloruros, realizándose la digestión a  $150\text{ }^\circ\text{C}$  durante dos horas en el termoreactor. El oxígeno consumido se calcula mediante lectura en el espectrofotómetro con porta celda a una longitud de onda de  $620\text{ nm}$ . Por el cambio de color del cromo en estado hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ) a un estado trivalente ( $\text{Cr}^{+3}$ ) que absorben en la región visible del espectro. El ion dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$ ) absorbe fuertemente en la región de los  $400\text{ nm}$ , donde el ion crómico ( $\text{Cr}^{+3}$ ) absorbe mucho menos. El ion  $\text{Cr}^{+3}$  absorbe fuertemente en la región de los  $600\text{ nm}$ , donde el ion dicromato tiene una absorción cercana a cero (APHA, 1992)

➤ **Dureza total**

Se realiza por el método volumétrico, midiendo  $50\text{ mL}$  de muestra y se agrega cinco gotas de solución buffer 10 con  $2\text{ mg}$  de negro erio cromo T (NET), la solución se torna de color violeta, luego se titula con etilendiaminotetracético (EDTA)  $0.01\text{ N}$  hasta el viraje a azul cielo (APHA, 1992). Se anota el gasto obteniendo el resultado con la fórmula siguiente:

$$\text{Dureza total (mg/L)} = \frac{\text{gasto mL} * N * PM * 1000}{V} \quad (23)$$

Donde:

$N$  = Normalidad del EDTA

$PM$  = Peso molecular del carbonato de calcio

$V$  = Volumen de muestra

### ➤ **Alcalinidad total**

Se realiza por el método volumétrico, se toma 50 mL de muestra y se agrega 5 gotas de indicador anaranjado de metilo tornándose la solución amarilla. La titulación se efectúa con ácido sulfúrico 0.02 N hasta que la solución vire a naranja salmón (APHA, 1992). Se anota el gasto obteniendo los resultados con la formula siguiente:

$$\text{Alcalinidad total (mg/L)} = \frac{\text{gasto mL} * PE * 1000}{V} \quad (24)$$

Donde:

$N$  = Normalidad del  $H_2SO_4$

$PE$  = Peso equivalente del carbonato de calcio

$V$  = Volumen de muestra

### ➤ **pH**

La técnica consiste en estimar la actividad de los iones hidrógeno por medidas potenciométricas usando un electrodo combinado o un electrodo estándar de hidrógeno de vidrio con un electrodo de referencia. El electrodo de vidrio generalmente no está sujeto a interferencias como color, turbidez, materia coloidal, oxidantes, reductores o alta salinidad. (APHA, 1992) recomienda usar el pHmetro previamente calibrado en una solución buffer y luego medir la muestra a la misma temperatura.

➤ **Conductividad**

Se realiza por la técnica potenciométrica, se usa el equipo multiparámetros previamente calibrado. Se toma un volumen aproximado de 150 mL de muestra y se introduce el electrodo, se mide el resultado directamente cuando se estabiliza la lectura.

➤ **Sólidos Totales**

Se pesa un vaso de precipitación limpio y seco, luego se mide 100 mL de muestra y se agrega en el vaso previamente pesado. Se evapora el contenido hasta sequedad a una temperatura de 105 °C. Se deja enfriar el vaso de precipitación y se pesa nuevamente. La diferencia de peso es el contenido de sólidos totales en la muestra (APHA, 1992)

➤ **Turbidez**

Este método se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas con la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones. Cuanto mayor sea la intensidad de la luz dispersada, mayor será la turbidez. El instrumento empleado es el Turbidímetro, que es un nefelómetro con una fuente de luz para iluminar la muestra y uno o más detectores fotoeléctricos con mecanismo de lectura para indicar la intensidad de la luz dispersada a 90° del camino de luz incidente (APHA, 1992) .

➤ **ORP**

El potencial Redox es una técnica que consiste en medir la energía química de óxido-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica, el potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Normalmente las reacciones redox vienen acompañadas de cambios de pH del medio. Se mide directamente a través de un equipo multiparamétrico.

### **3.7. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

La recolección de datos se llevó a cabo mediante trabajo de campo para obtener las muestras de agua residuales mediante muestreo al azar. Se efectuaron mediciones de temperatura in situ, luego las muestras son transportadas a la brevedad posible al laboratorio y en condiciones de oscuridad. Se efectuaron pruebas iniciales de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales.

Durante y después de la aplicación del proceso Fenton, se hacen las mediciones correspondientes para evaluar el comportamiento de la DQO a las diferentes condiciones del reactivo de Fenton. Los análisis realizados son de tipo instrumental y los datos obtenidos son almacenados en un plantilla Excel para su posterior procesamiento.

### **3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DEL RESULTADO**

Los datos de los análisis de laboratorio almacenados y ordenados en la plantilla de Excel son importados al programa Statgraphics 5.1 plus para la aplicación de la metodología de superficie de respuesta, estadística descriptiva e inferencial y así determinar los valores óptimos del proceso Fenton, efectuar el contraste de hipótesis



mediante la prueba F de Fisher y comparación de rangos múltiples mediante la diferencia mínima significativa. En la prueba de hipótesis para la media se verificará que:

➤ Factor A ( $\text{FeSO}_4$ )

$H_0: \mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a  $\text{FeSO}_4$

$H_a: \mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a  $\text{FeSO}_4$ .

➤ Factor B ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

$H_0: \mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

$H_a: \mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

➤ Factor C (pH)

$H_0: \mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a pH.

$H_a: \mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a pH.

Se obtiene el valor el  $F_\alpha$  con los grados de libertad respectivos de la tabla de puntos críticos al 5 % de la distribución F.

$$\text{Si: } F_0 < F_{\text{tabla}}$$

No hay efecto significativo sobre la remoción de DQO.

### 3.9.- AMBITO DE ESTUDIO

Aguas residuales del camal municipal de Chota – Cajamarca.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

##### 4.1.1.- Caracterización Físicoquímica inicial de las aguas residuales

Se tomaron las muestras de las aguas residuales del camal de Chota (mayo 2017) y se efectuó la caracterización físicoquímica en el laboratorio de análisis químico del proyecto de investigación en mención.

Tabla 11  
Composición Físicoquímica inicial de las aguas residuales del camal de Chota

Parámetro	Expresado como	Agua residual del camal de Chota
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	1874
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	4654.4
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	1536
Alcalinidad total	Mg CaCO <sub>3</sub> /L	7200
Potencial de Hidrogeno	pH	7.6
Conductividad	μS/cm	1560
Solidos Totales	mg/L	3361
OD	mg O <sub>2</sub> /L	1.22
Turbidez	NTU	327
ORP	mV	-273.1
Temperatura	°C	18.3

Así mismo se efectuó un estudio de presuntivo de bacterias patógenas a nivel de familias en las aguas residuales del camal de Chota, usando medios de cultivo selectivos (ver anexo 02), obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 12  
Presunción de microorganismos patógenos en muestra inicial de las aguas residuales del camal de Chota

Tipo de microorganismo	Medio de cultivo (agar)	Presunción
Enterobacterias	Mc. Conkey	Positivo
Vibrio Scholerae	TBCS	Positivo
Vibrio Parahaemolyticus		
Salmonella	SS	
Shigella		Positivo

#### 4.1.2.- Cálculo del índice de biodegradabilidad (IB) inicial de las aguas residuales.

De la tabla 6 y con la fórmula:

$$IB = \frac{DBO}{DQO} \quad (23)$$

Se tiene:  $IB = \frac{1874}{4654.4} = 0.403$

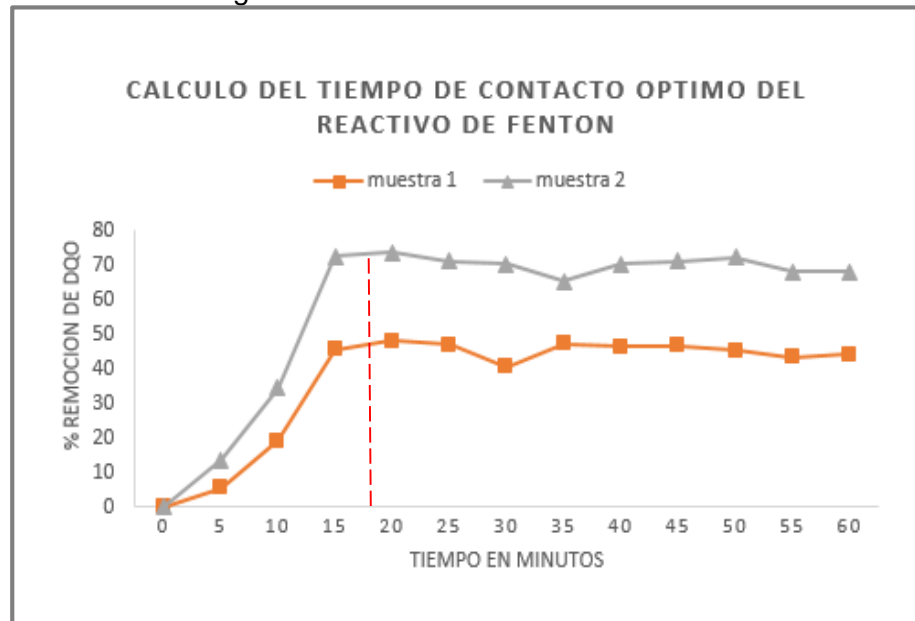
#### 4.1.3.- Cálculo del tiempo óptimo de contacto del reactivo de Fenton en aguas residuales del camal de Chota.

Tabla 13  
Corridas Experimentales para el cálculo del tiempo de contacto óptimo del proceso Fenton.

TIEMPO (min)	MUESTRA 1		MUESTRA 2	
	Nivel bajo del reactivo Fenton		Nivel alto del reactivo Fenton	
	DQO <sub>TOTAL</sub>	% REMOCION	DQO <sub>TOTAL</sub>	% REMOCION
0	4654,4	0,0	4654,4	0,0
5	4403,1	5,4	4016,7	13,7
10	3877,1	19,3	3053,3	34,4
15	3290,7	45,5	1182,2	72,6
20	2392,4	48,2	1265,9	73,8
25	2415,6	47,1	1345,2	71,1
30	2429,6	40,6	1382,4	70,3
35	2448,2	47,4	1461,5	65,5
40	2490,1	46,5	1373,1	70,5
45	2476,1	46,8	1340,5	71,2
50	2550,6	45,2	1405,6	72,3
55	2629,7	43,5	1480,1	68,2
60	2504,1	44,1	1484,7	68,1

Nivel bajo del reactivo Fenton: FeSO<sub>4</sub> = 1500 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 800 mg/L pH = 2.5  
 Nivel alto del reactivo Fenton : FeSO<sub>4</sub> = 2500 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 1200 mg/L pH = 3.5  
 Presión: atmosférica Temperatura: ambiente

Grafico 1  
 Tiempo de contacto óptimo del reactivo de Fenton a pH ajustado a 3  
 sobre las aguas residuales del camal de Chota



#### 4.1.4.- Porcentajes de remoción de DQO en aguas residuales del camal de Chota.

La tabla 14 detalla los porcentajes de remoción de la DQO a las condiciones establecidas para el diseño experimental Box – Behnken, se realizó una corrida inicial con dos réplicas con la finalidad de minimizar el ruido experimental, haciendo un total de 45 ensayos para el período de experimentación. El cálculo del porcentaje de remoción de DQO<sub>total</sub> se realiza con la siguiente formula:

$$\% \text{ REMOCIÓN DQO} = \frac{DQO_{INICIAL} - DQO_{REMANENTE}}{DQO_{INICIAL}} \quad (24)$$

#### 4.1.5.- Condiciones óptimas de aplicación del proceso Fenton en aguas residuales del camal de Chota.

Las condiciones óptimas del proceso Fenton sobre las aguas del camal de Chota se calcularon con el software

Statgraphics 5.1 plus, se seleccionó y adecuó el diseño Box – Behnken con sus respectivas réplicas, luego se exportó desde Excel, la plantilla con los datos experimentales de la tabla 14, obteniéndose una superficie de respuesta para la remoción de  $DQO_{total}$  como se muestra en el gráfico 2.

Tabla 14

Corridos Experimentales en aguas residuales del camal de Chota de acuerdo al diseño BOX – BEHNKEN.

EXP.	PLAN EXPERIMENTAL			MUESTRA INICIAL		REPLICA 1		REPLICA 2	
	FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	pH	DQO = 4654,4 mg/L		DQO = 4654,4 mg/L		DQO = 4654,4 mg/L	
				DQO <sub>FINAL</sub> (mg/L)	% REMOCION	DQO <sub>FINAL</sub> (mg/L)	% REMOCION	DQO <sub>FINAL</sub> (mg/L)	% REMOCION
1	1250	800	3	1390,73	65,12	1421,92	63,22	1453,10	66,75
2	1250	1200	3	992,78	72,23	1618,33	70,23	1470,33	69,41
3	2500	800	3	1209,67	69,01	1337,21	71,27	1292,99	68,78
4	2500	1200	3	1123,11	72,87	1241,79	73,20	1140,79	75,49
5	1250	1000	2,5	2433,78	47,71	2358,85	49,32	2219,22	45,32
6	1250	1000	3,5	1041,65	60,62	1145,45	62,82	1280,89	61,48
7	2500	1000	2,5	2168,48	49,41	2107,05	51,73	2250,40	51,65
8	2500	1000	3,5	1096,11	74,45	1122,17	75,89	1075,63	76,89
9	1875	800	2,5	2107,97	55,71	2306,25	53,45	2217,35	53,36
10	1875	800	3,5	1409,39	69,43	1416,80	70,10	1297,65	72,12
11	1875	1200	2,5	1703,04	52,41	1784,03	54,67	1721,66	49,01
12	1875	1200	3,5	951,36	74,56	1022,57	73,03	1200,83	73,20
13	1875	1000	3	1079,35	78,81	999,30	78,53	956,48	76,45
14	1875	1000	3	1043,51	77,90	1133,34	75,78	929,45	77,23
15	1875	1000	3	1199,91	78,22	1051,43	77,41	1023,50	75,01

Presión: Atmosférica

Temperatura: Ambiente

Gráfico 2  
Superficie de respuesta estimada a pH = 3 para la remocion de DQO de las aguas residuales del camal de Chota

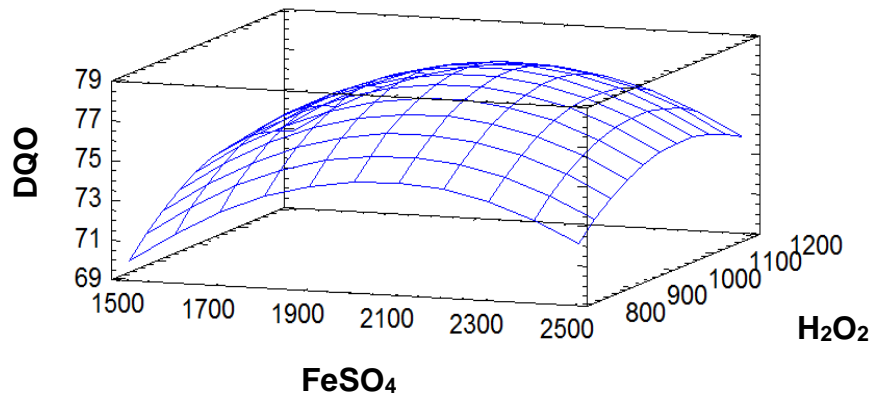


Gráfico 3  
Contornos de superficie de la respuesta estimada a pH ajustado a 3, para la remoción de DQO de las aguas residuales del camal de Chota.

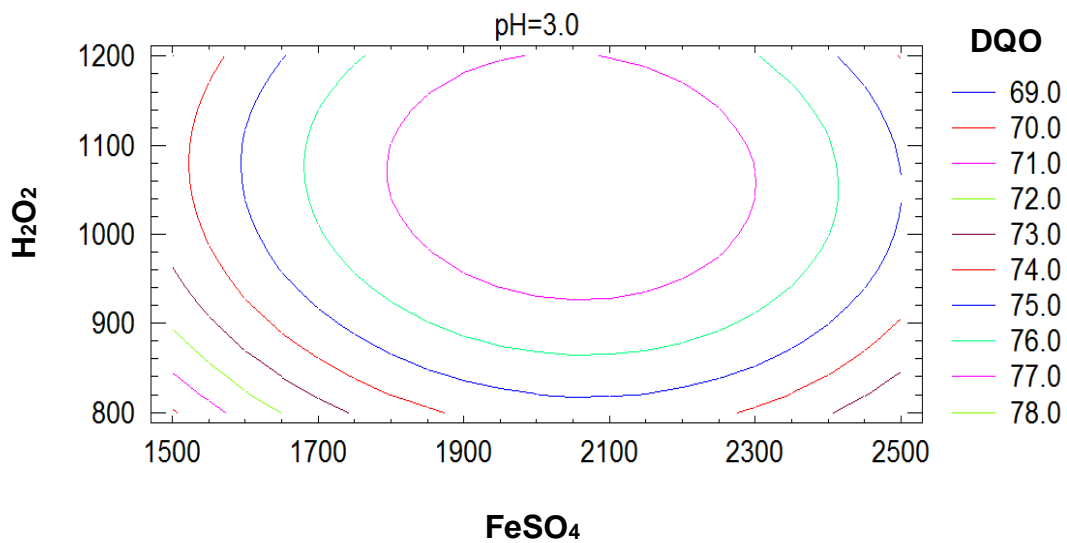


Tabla 15  
Optimización de los factores del proceso Fenton para degradar las a aguas residuales del camal de Chota

Factor	Nivel inferior	Nivel Superior	Óptimo	Remoción de DQO optimo estimado
FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	1250	2500	2110,55	
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	800	1200	1092,67	80,28%
pH	2,5	3,5	3,22	

Presión: atmosférica Temperatura: ambiente

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

Tabla 16  
Análisis de la varianza para la demanda química de oxígeno en aguas  
residuales del camal de chota

Fuente	Suma de cuadrados	G. L	Cuadrado medio	F - ratio	P - valor
A: FeSO <sub>4</sub>	16,4959	1	16,4959	4,00	0,0539
B: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35,3687	1	35,3687	8,57	0,0062
C: Ph	2289,16	1	2289,16	554,50	0,0000
AA	341,709	1	341,709	82,77	0,0000
AB	1,52653	1	1,52653	0,37	0,5473
AC	84,6414	1	84,6414	20,50	0,0001
BB	40,304	1	40,304	9,76	0,0037
BC	20,2021	1	20,2021	4,89	0,0340
CC	1804,93	1	1804,93	437,21	0,0000
Bloques	2,59694	2	1,29847	0,31	0,7323
Error total	136,235	33	4,12832		
Total (Corr.)	4793,3	44			

R – cuadrado : 97,1578 %  
R – cuadrado : 96,427 % (ajustado para g.l)  
Error Estándar : 2,0318  
Error Absoluto de la media : 1,4099  
Estadístico Durbin – Watson : 2,25589 (P 0,1094)

La ecuación de la regresión al modelo matemático ajustado es:

$$DQO = - 472,501 + 0.0357713 A + 0,0684646 B + 296,687 C - 1,42187 \cdot 10^{-5} A^2 - 2,853 \cdot 10^{-6} AB + 8,49867 \cdot 10^{-3} AC - 4,76875 \cdot 10^{-5} B^2 + 1,2975 \cdot 10^{-2} BC - 51,06 C^2$$

Donde: FeSO<sub>4</sub> = A      H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = B      pH = C

Gráfico 4  
Diagrama de Pareto de los efectos de las variables para la remoción de DQO de las aguas residuales del camal de Chota.

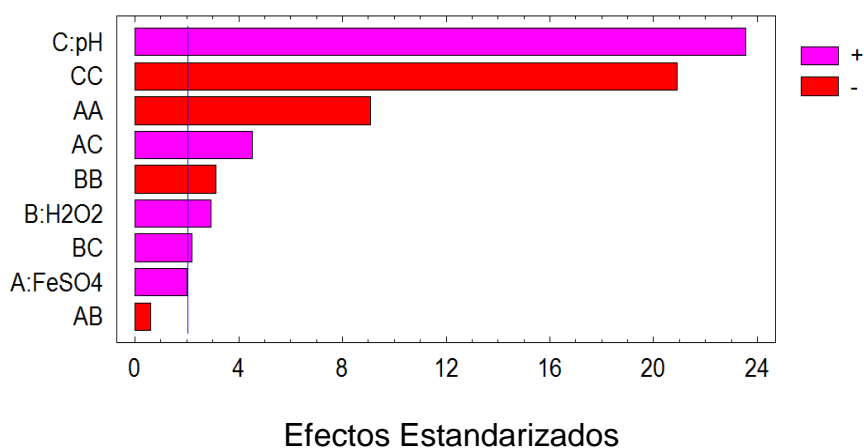
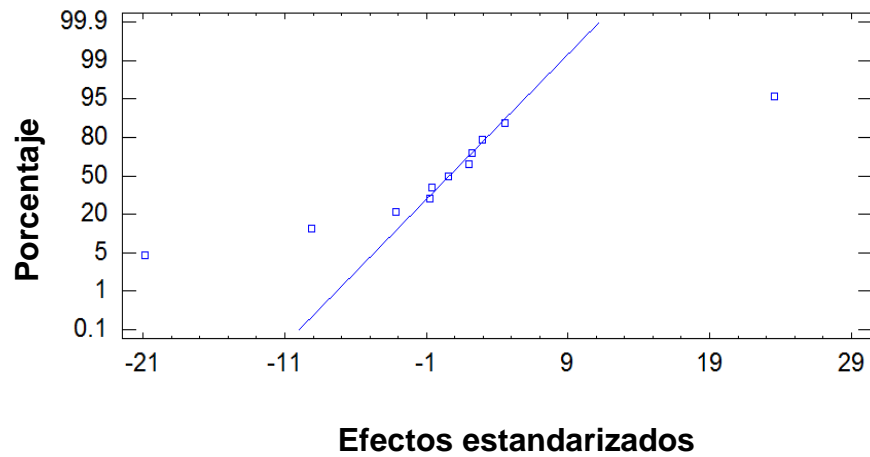




Gráfico 5  
 Probabilidad normal para la demanda química de oxígeno de las  
 aguas de camal de Chota.



**4.1.7.- Cinética de la remoción de DQO de las aguas  
 residuales del camal de Chota a condiciones óptimas  
 del proceso Fenton.**

Tabla 17  
 Cinética de la reacción Fenton para la remoción de DQO en  
 aguas residuales del camal de Chota

TIEMPO (min)	DQO FINAL	% REMOCION
0	4654,40	0,00
3	4174,53	10,31
6	3440,99	26,07
9	2659,98	42,85
12	1925,99	58,62
15	1525,71	67,22
18	934,14	79,93
21	1013,26	78,23

Condiciones de operación:  
 FeSO<sub>4</sub> = 2110,55 mg/L    H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 1092,67 mg/L    pH = 3,22  
 Presión: Atmosférica    Temperatura: Ambiente

➤ **Cinética de orden cero**

La ecuación que gobierna una cinética de orden cero  
 está dada por:

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

Integrando y ordenando se tiene:

$$[DQO]_t = -kt + constante \quad (25)$$

Con los valores de tiempo y concentración de la DQO de la tabla 17 se alimentan al programa Statgraphics 5.1 plus y se aplica un análisis de regresión para los datos.

La tabla 18 muestra el análisis de regresión para una cinética de reacción de orden cero del proceso Fenton sobre las aguas residuales del camal de Chota.

Tabla 18

Análisis de regresión múltiple para la cinética de orden cero del proceso Fenton sobre la remoción de DQO en aguas residuales del camal de Chota

Variable dependiente: [DQO]

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P - valor
Constante	4548,2	181,16	25,1059	0,0000
T	- 191,15	14,4352	-13,2419	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente - F	P - valor
Modelo	1,38115E7	1	1,38115E7	175,35	0,0009
Residuo	472595,0	6	78765,8		
Total (Corr.)	1,42841E7	7			

R – cuadrado : 96,6915 %

R – cuadrado (ajustado para g.l) : 96,14 %

Error estándar de est. : 280,652

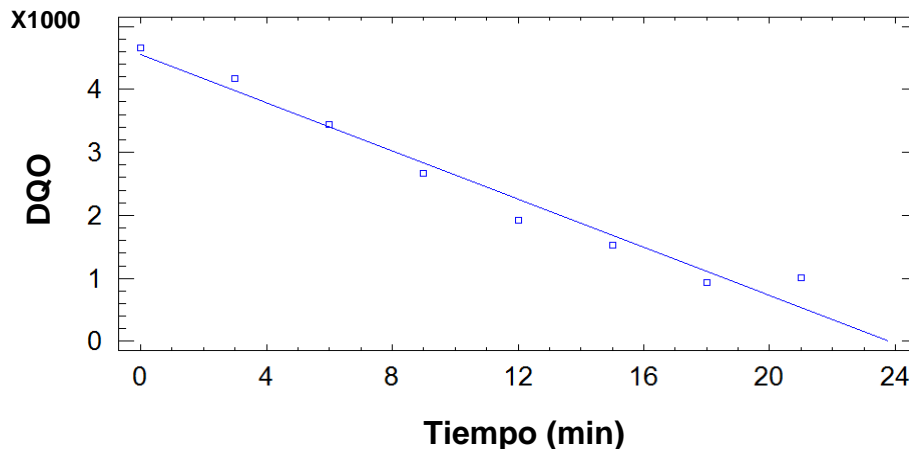
Error absoluto medio : 206,22

Estadístico Durbin – Watson : 1,18369 (P = 0,0296)

El modelo ajustado para la regresión lineal que permite describir la relación entre el  $[DQO_{(mg/L)}]$  vs  $t_{(min)}$  para una cinética de orden cero es:

$$[DQO] = 4548,2 - 191,15 *t$$

Gráfico 6  
 Modelo Ajustado [DQO] vs t (min) de la cinética de reacción para orden cero  
 del proceso Fenton sobre agua residuales del camal de Chota.



➤ **Cinética de primer orden**

La ecuación que gobierna una cinética de primer orden está dada por:

$$\frac{d[DQO]}{dt} = -k[DQO]_0$$

Integrando y ordenando se tiene:

$$[DQO]_t = [DQO]_0 e^{-kt}$$

Linealizando:  $\ln[DQO]_t = -kt + constante$  (26)

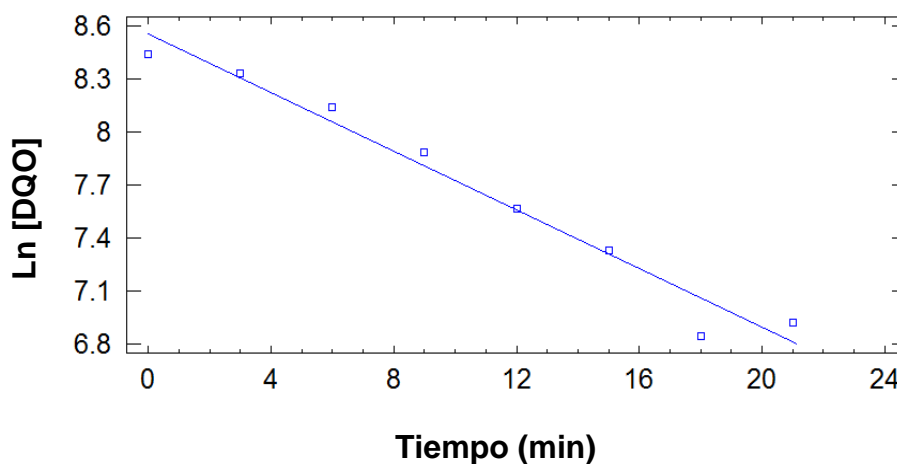
Con los valores de tiempo y concentración de la DQO de la tabla 17 se aplica un análisis de regresión para los datos. La tabla 19 muestra el análisis de regresión para una cinética de reacción de primer orden.

Tabla 19  
Análisis de regresión múltiple para la cinética de primer orden del proceso Fenton sobre la remoción de DQO en aguas residuales del canal de Chota

Variable dependiente: ln [DQO]					
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P – valor	
Constante	8,5549	0,0780921	149,549	0,0000	
T	-0,0830179	0,00622253	-13,3415	0,0000	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente - F	P – valor
Modelo	2,60516	1	2,60516	178,00	0,0019
Residuo	0,0878167	6	0,014636		
Total (Corr.)	2,69298	7			

R – cuadrado : 96,74 %  
R – cuadrado (ajustado para g.l) : 96,19 %  
Error estándar de est. : 0,12098  
Error absoluto medio : 0,0826  
Estadístico Durbin – Watson : 2,2325 (p = 0,1862)

Gráfico 7  
Modelo Ajustado ln[DQO] vs t (min) de la cinética de reacción de primer orden del proceso Fenton sobre las aguas residuales de canal de Chota.



El modelo ajustado para la regresión lineal que permite describir la relación entre el ln [DQO<sub>(mg/L)</sub>] vs t<sub>(min)</sub> para una cinética de primer orden es:

$$\ln[\text{DQO}] = 8,5549 - 0,0830179 \cdot t$$

➤ **Cinética de segundo orden**

La ecuación que gobierna una cinética de segundo orden está dada por:

$$\frac{d[DQO]}{dt} = -k[DQO]^2$$

Integrando y ordenando se tiene:

$$[DQO]_t = ([DQO]_0^{-1} + kt)^{-1}$$

Linealizando:

$$\frac{1}{[DQO]_t} = \frac{1}{[DQO]_0} + kt \quad (27)$$

Con los valores de tiempo y concentración de la DQO de la tabla 17 se alimentan al programa statgraphics 5.1 plus y se aplica un análisis de regresión para los datos. La tabla 20 muestra el análisis de regresión para una cinética de reacción de segundo orden.

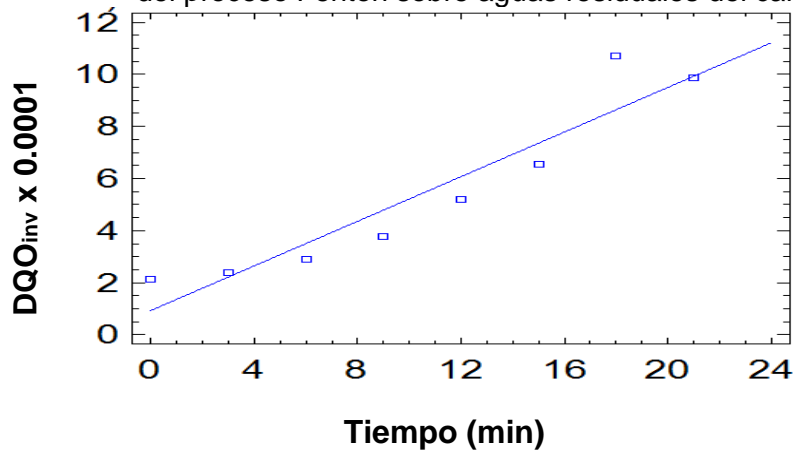
Tabla 20

Análisis de regresión múltiple para la cinética de segundo orden del proceso Fenton sobre la remoción de DQO en aguas residuales del camal de Chota

Variable dependiente: 1/[DQO]					
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P - valor	
Constante	9,41667E-5	7,73715E-5	1,21707	0,2396	
T	4,28567E-5	6,16511E-6	6,9515	0,0004	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente – F	P – valor
Modelo	6,9427E-7	1	6,94273E-7	48,32	0,0004
Residuo	8,6203E-8	6	1,43672E-8		
Total (Corr.)	7,8047E-7	7			
R – cuadrado : 88,955 %					
R – cuadrado (ajustado para g.l) : 87,1142 %					
Error estándar de est. : 0,00011986					
Error absoluto medio : 0,0000857					
Estadístico Durbin – Watson : 1,70 (p = 0,1880)					

Gráfico 8

Modelo Ajustado 1/[DQO] vs t (min) de la cinética de reacción de segundo orden del proceso Fenton sobre aguas residuales del canal de Chota.



El modelo ajustado para la regresión lineal que permite describir la relación entre el [DQO] vs t (min) para una cinética de segundo orden es:

$$[DQO] = 0,0000941667 - 0,0000428567*t$$

**4.1.8.- Remoción de la DQO en aguas residuales a condiciones óptimas del proceso Fenton**

Tabla 21  
Demanda Química de Oxígeno final y porcentajes de remoción en aguas residuales a condiciones óptimas del proceso Fenton

Proceso Fenton	Optimo	DQO <sub>FINAL</sub> (mg/L)	% REMOCION
FeSO <sub>4</sub>	2110,55 mg/L		
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1092,67 mg/L	934,14	79,93
pH	3,22		

Condiciones de operación:  
Presión: Atmosférica    Temperatura: Ambiente

Con los factores optimizados se alcanzó una remoción de DQO de 79,93% para las aguas residuales del canal de Chota a condiciones ambientales, verificándose que el proceso Fenton es efectivo para remover materia orgánica a condiciones ambientales.

**4.1.9.- Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales del camal de Chota después de la aplicación de proceso Fenton optimizado.**

Después de aplicar el proceso Fenton con sus factores optimizados, se analizó nuevamente la composición química de las aguas residuales obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 22.

Tabla 22  
Composición Fisicoquímica después de la aplicación Fenton optimizado de las aguas residuales del camal de Chota

Parámetro	Expresado como	Agua residual del camal de Chota
DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /L	468
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	934,14
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	294
Alcalinidad total	Mg CaCO <sub>3</sub> /L	246
Potencial de Hidrogeno	pH	7.1
Conductividad	μS/cm	6063
Solidos Totales	mg/L	412
OD	mg O <sub>2</sub> /L	8,10
Turbidez	NTU	7,4
ORP	mV	11,4
Temperatura	°C	16
Resistividad	MΩ.cm	0.0002

Tabla 23  
Presunción de microorganismos patógenos en las aguas residuales del camal de Chota después de la aplicación del proceso Fenton optimizado

Tipo de microorganismo	Medio de cultivo (agar)	Presunción
Enterobacterias	Mc. Conkey	Negativo
Vibrio Cholerae	TBCS	Negativo
Vibrio Parahaemolyticus		
Salmonella	SS	Negativo
Shigella		

**4.1.14.- Cálculo del índice de biodegradabilidad (IB) de las aguas residuales después del tratamiento Fenton optimizado.**

De la tabla 22 se relaciona la DBO y la DQO alcanzada con el proceso Fenton optimizado.

$$IB = \frac{468}{934,14} = 0,5$$

#### 4.1.15.- PRUEBA DE HIPÓTESIS

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

Tabla 24  
Análisis de la varianza para la demanda química de oxígeno en aguas residuales del camal de chota

Fuente	Suma de cuadrados	G.L	Cuadrado medio	F - ratio	P - valor
A: FeSO <sub>4</sub>	16,4959	1	16,4959	4,00	0,0539
B: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	35,3687	1	35,3687	8,57	0,0062
C: Ph	2289,16	1	2289,16	554,50	0,0000
AA	341,709	1	341,709	82,77	0,0000
AB	1,52653	1	1,52653	0,37	0,5473
AC	84,6414	1	84,6414	20,50	0,0001
BB	40,304	1	40,304	9,76	0,0037
BC	20,2021	1	20,2021	4,89	0,0340
CC	1804,93	1	1804,93	437,21	0,0000
Bloques	2,59694	2	1,29847	0,31	0,7323

Luego:

$$F_{0,05,7,4} = 6,094 \quad \text{por tanto} \quad F_{tabla} = 6,094$$

➤ Factor A (FeSO<sub>4</sub>)

H<sub>0</sub>:  $\mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a FeSO<sub>4</sub>.

H<sub>a</sub>:  $\mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a FeSO<sub>4</sub>

De la tabla 24 se observa que  $F_0 = 4$  donde:

$$F_0 < F_{tabla}$$



Por lo tanto; se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula.

➤ Factor B (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

H<sub>0</sub>:  $\mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

H<sub>a</sub>:  $\mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

De la tabla 24 se observa que  $F_0 = 8,57$  donde:

$$F_0 > F_{tabla}$$

Por lo tanto; se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

➤ Factor C (pH)

H<sub>0</sub>:  $\mu = 0$  No hay efecto en la remoción de DQO debido a pH.

H<sub>a</sub>:  $\mu \neq 0$  Si hay efecto en la remoción de DQO debido a pH.

De la tabla 24 se observa que  $F_0 = 554,5$  donde:

$$F_0 > F_{tabla}$$

Por lo tanto; se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

#### **4.1.16.- Pruebas de Rangos múltiples para aguas residuales del camal de Chota.**

Tabla 25  
 Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de  
 DQO por FeSO<sub>4</sub> en aguas residuales del camal de Chota.

Variable dependiente: DQO					
Factor: FeSO <sub>4</sub>		N° observaciones: 45		Niveles : 3	
ANOVA para DQO según FeSO <sub>4</sub>					
Análisis de la varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	Cociente F	P - valor
Entre Grupos	470,689	2	235,344	2,29	0,1141
Intra grupos	4322,62	42	102,919		
Total (corr.)	4793,3	44			
Contraste Múltiple de Rango para DQO según FeSO <sub>4</sub>					
Método : 95 % LSD					
FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	Frecuencia	Media	Grupos Homogéneos		
1250	12	61,1858	X		
2500	12	67,5533	X X		
1875	21	68,8758	X		
Contraste	Diferencias		Límites		
1250 – 1875	*-7,68988		7,40875		
1250 – 2500	-6,3675		8,3582		
1875 – 2500	1,32238		7,40875		

\* Indica una diferencia significativa

Gráfico 9  
 Gráfico de medias y 95 % de confianza de Fisher LSD para la remoción de  
 DQO por FeSO<sub>4</sub> en aguas residuales del camal de Chota

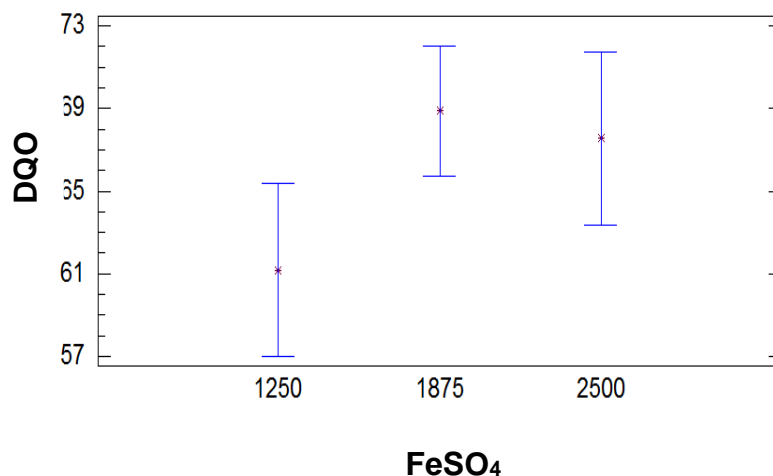


Tabla 26  
 Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de  
 DQO por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en aguas residuales del camal de Chota

Variable dependiente: DQO					
Factor: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		N° observaciones: 45		Niveles : 3	
ANOVA para DQO según H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>					
Análisis de la varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	Cociente F	P - valor
Entre Grupos	46,6584	2	23,3292	0,21	0,8143
Intra grupos	4746,55	42	113,015		
Total (corr.)	4793,3	44			
Contraste Múltiple de Rango para DQO según H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>					
Método : 95 % LSD					
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Frecuencia	Media	Grupos Homogéneos		
800	12	64,86	X		
1000	21	66,7919	X		
1200	12	67,5258	X		
Contraste	Diferencias		Límites		
800 – 1000	-1,9319		7,76363		
800 – 1200	-2,66583		8,75856		
1000 – 1200	-0,733929		7,76363		

\* Indica una diferencia significativa

Gráfico 10  
 Gráfico de medias y 95 % de confianza de Fisher LSD para la  
 remoción de DQO por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en aguas residuales del  
 camal de Chota

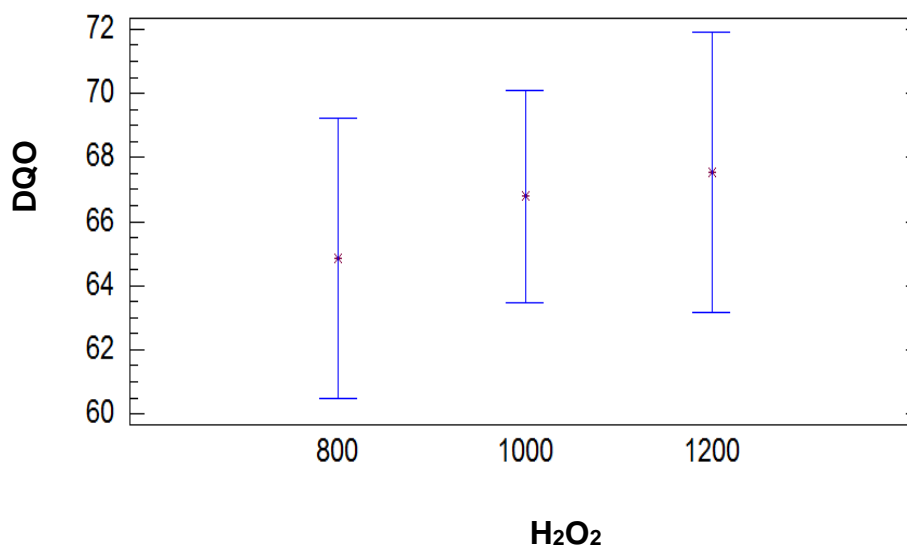
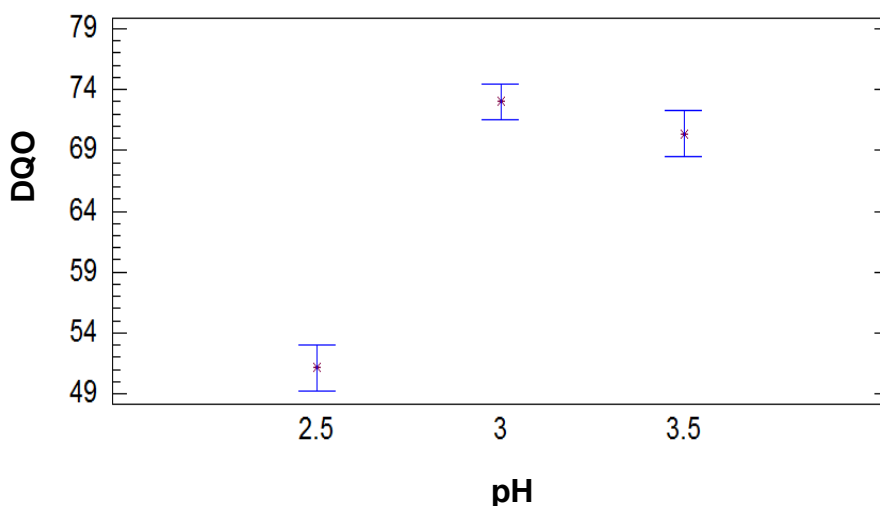


Tabla 27  
 Contraste Múltiple de Rangos para el porcentaje de remoción de DQO por pH  
 en aguas residuales del camal de Chota

Variable dependiente: DQO					
Factor: pH		N° observaciones: 45		Niveles : 3	
ANOVA para DQO según pH					
Análisis de la varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	G.L.	Cuadrado medio	Cociente F	P – valor
Entre Grupos	3896,07	2	1948,03	91,19	0,000
Intra grupos	897,237	42	21,3638		
Total (corr.)	4793,3	44			
Contraste Múltiple de Rango para DQO según pH					
Método : 95 % LSD					
pH	Frecuencia	Media	Grupos Homogéneos		
2,5	12	51,1458	X		
3,5	12	70,3825	X		
3,0	21	72,9962	X		
Contraste	Diferencias		Límites		
2,5 – 3,0	*-21,8504		3,3754		
2,5 – 3,5	*-19,2367		3,80797		
3,0 – 3,5	-2,61369		3,3754		

\* Indica una diferencia significativa

Gráfico 11  
 Gráfico de medias y 95 % de confianza de Fisher LSD para la remoción de DQO por pH en aguas residuales del camal de Chota



#### 4.2.- DISCUSION

De la tabla 11 se puede apreciar que las aguas residuales del camal de Chota poseen una DBO y DQO elevada para ser eliminada hacia un cuerpo receptor. En general los valores medidos se encuentran en

niveles altos lo que permite inferir que las aguas del camal de Chota no pueden ser descargadas directamente sobre cuerpos de agua sino se le ha efectuado un previo tratamiento.

Los valores medidos de pH y oxígeno disuelto (OD) en la tabla 11 tiene relación directa con el valor medido de oxidación-reducción (ORP) cuyo valor de -273.1 mV indica que las aguas residuales del camal tienen características de un medio reductor, con tendencias a pH alcalinos, con una considerable disminución de la concentración de oxígeno disuelto, y consiguiente reducción de iones y moléculas. La temperatura medida es otro indicador que no favorece la mayor solubilidad de oxígeno en el agua y junto a ello la alta demanda de oxígeno hacen que las aguas tengan altos niveles de contaminación.

En cuanto a la dureza se puede visualizar un valor alto, lo mismo sucede en el valor de la alcalinidad lo que supone que los desechos del faenado provocan dichos incrementos y no directamente el agua que se utiliza. Por otro lado se tiene una conductividad relativamente baja debido a las grandes volúmenes de agua que se utilizan en el camal y que provocan la dilución de los contaminantes (Barquín et al.,2011), sin embargo se puede ver un valor alto para los sólidos totales, debido a que las aguas residuales de descarga llevan consigo desechos fecales, pelos, materia orgánica coagulada etc.

Los resultados de la caracterización de las aguas residuales del camal de Chota guardan concordancia con los valores citados en la bibliografía revisada para la aplicación del proceso Fenton al tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios que han sido

estudiadas como tales y acondicionadas una agua residual (Méndez, et al., 2010, Barquín, et al., 2011, Primo, 2008).

La tabla 12 muestra un análisis microbiológico presuntivo donde se sospecha que las aguas residuales del camal de Chota son potencialmente peligrosas por la probable presencia de bacterias causantes de enfermedades Diarreico aguas (EDAs), que en muchos de los casos hospitalarios es causa de muerte de personas, sin embargo para confirmar la sospecha se requieren de análisis bioquímicos más específicos para determinar con una probabilidad del 90% que se trata de la especie indicada, lo cual no es objeto del presente estudio.

El cálculo del IB inicial igual a 0.4 establece que las aguas residuales del camal de Chota son parcialmente biodegradables, a pesar de la sangre, deyecciones y materia fecal que componen el agua residual y que tienen naturaleza biodegradable, se puede inferir de la probabilidad de que exista la liberación de grandes moléculas orgánicas recalcitrantes provenientes de los mismos residuos o provocado por alguna sustancia de naturaleza química, que estaría provocando una inhibición del metabolismo microbiano para un proceso de oxidación biológico (Escudero, 2012) ya que el valor del IB se encuentra en el límite de clasificación entre una agua residual parcialmente biodegradable y de difícil degradación.

En general la degradación o mineralización de sustancias contaminantes en las aguas residuales del camal de Chota mediante el proceso Fenton, se producen debido a que se suscitan profundos

cambios estructurales de las moléculas, que pueden ser llevados a cabo por diferentes mecanismos de reacción como: La abstracción de átomos de hidrógeno, adiciones electrofílicas, reacciones de transferencia de electrones e interacción radicalaria.

Para el cálculo del tiempo óptimo de contacto de la reacción de Fenton, se tomó el nivel bajo y alto del reactivo de Fenton de acuerdo a lo establecido en la tabla 7, a un pH ajustado a 3. Las alícuotas de agua residual en reacción se tomaron a intervalos de tiempo preseleccionados como se muestra en la tabla 13, luego se eleva el pH arriba de 7 con NaOH 5 M con la finalidad de favorecer la precipitación del fierro y detener la reacción. Para el exceso de peróxido de hidrógeno se agregó 0,1 g de MnO<sub>2</sub>, dando un tiempo prudente hasta el cese de burbujeo en la muestra.

Como se puede observar en el gráfico 1, el tiempo estimado como más idóneo para calcular los porcentajes de remoción de DQO de las aguas residuales está próximo a los 18 minutos para ambos niveles de reactivo Fenton.

Conforme avanza el tiempo de reacción a partir de los 18 minutos se puede considerar un comportamiento asintótico. Tiempos cortos como 5 minutos y más prolongados como 90 minutos fueron obtenidos por investigadores en diferentes matrices estudiadas, (Zgajnar et.al., 2011; Méndez et al., 2010; Zazouli et al., 2012) sin embargo dicho cálculo del tiempo de reacción depende exclusivamente de las características fisicoquímicas del agua residual en cuestión.

Para el cálculo del tiempo de contacto óptimo el pH juega un rol determinante, se ajustó a 3 de acuerdo a lo recomendado por varios

autores como el más adecuado para el buen desempeño del proceso Fenton. (Nalinrut et. al., 2011, Zazouli et. al., 2012, Augustine et. al., 2012, Salas, 2010). Así también, el medio ácido favorece la presencia del ion  $Fe^{+2}$  y la inhibición de la descomposición espontánea del  $H_2O_2$ , la que puede estar relacionado con la mayor presencia de radicales  $OH^*$  en los primeros 18 minutos ya que poco a poco los iones  $Fe^{+2}$  se hacen más escasos hasta que la reacción se hace menos eficiente.

La tabla 14 detalla las 15 corridas experimentales iniciales con 2 réplicas haciendo un total de 45 ensayos. La grafica 2 señala la superficie de respuesta obtenida, que es ligeramente parabólica con punto de loma para la remoción de la DQO en las aguas residuales del camal de Chota. El comportamiento tridimensional se ajusta a un modelo de segundo orden, lo que supone un punto óptimo del proceso Fenton sobre las aguas residuales. El gráfico 3 muestra la proyección bidimensional de la superficie de respuesta para la época de estudio donde cada línea de contorno indica un número infinito de combinaciones de las cantidades de reactivo de Fenton y pHs para la degradación de las aguas residuales. En el centro de la elipse más pequeña del gráfico de contornos se ubica los valores óptimos de la aplicación del proceso Fenton y corresponde a 2110,55 mg/mL de sulfato ferroso, 1092,67 mg/mL de peróxido de hidrógeno y un pH de 3,22.

De la tabla 14 se puede apreciar que los experimentos 5, 7, 9 y 11 reportan remociones bajas de DQO, debido a que los valores de pH usados de acuerdo al experimento están muy por debajo del óptimo, esto puede explicarse desde tres puntos de vista: primero, el



$[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})]^{+2}$  formado reacciona relativamente muy lento con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  produciendo menos radicales  $\text{OH}^*$ , segundo, el efecto de barrido del  $\text{H}^+$  sobre el  $\text{OH}^*$  es cada vez más importante a pHs bajos y tercero que pHs bajos pueden inhibir la reacción entre  $\text{Fe}^{+3}$  y el  $\text{H}_2\text{O}_2$ . (Deng & Englehardt, 2006).

Por otro lado a pHs por encima del óptimo también puede obstaculizar el proceso Fenton, la tabla 14 expresa variaciones marcadas de remoción de DQO. Los experimentos 8, 10 y 12 muestran remociones aceptables que no están muy alejadas del valor óptimo, sin embargo este comportamiento puede tomarse como punto de partida al proceso de inhibición del proceso Fenton cuando dichos pHs alcanzan valores por encima de 4. El proceso de obstaculización del proceso Fenton puede explicarse por la disminución del medio ácido que puede inhibir la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  reduciendo la producción de  $\text{OH}^*$ , la rápida descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en agua y oxígeno con el incremento del pH o el catalizador de hierro es desactivado con la formación de oxihidróxido férrico (Deng & Englehardt, 2006).

La tabla 15 predice el máximo porcentaje de remoción de la DQO si se logra dosificar con precisión los reactivos de Fenton y llevar un control minucioso de los parámetros en especial el pH, sin embargo ello está sujeto a errores de medición y control del operador y de las condiciones ambientales del lugar.

La tabla 16 muestra el análisis de la varianza para la DQO para las aguas residuales del camal de Chota, se pueden verificar 7 de los efectos que tienen los P-valores inferiores a 0,05; lo cual indica que

son estadísticamente significativos sobre la remoción de la DQO a un nivel de confianza del 95 %. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica aproximadamente el 97% % de la variabilidad en DQO.

El estadístico R-cuadrado ajustado para los grados de libertad es 96,4 % el cual se propone como el más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es decir; la remoción de DQO de las aguas residuales del camal de Chota depende fuertemente del pH, concentración de sulfato ferroso, peróxido de hidrogeno, interacciones y efectos cuadráticos tal como se puede apreciar en el diagrama de Pareto de la gráfica 4, donde la longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, o lo que es lo mismo el efecto estimado dividido por su error estándar. Cualquier efecto que traspase la línea vertical azul indica que dicho efecto es estadísticamente significativo.

El gráfico 5 reafirma lo expuesto en el diagrama de Pareto, muestra el comportamiento de los efectos estandarizados, y cuáles de dichos efectos son más significativos con respecto a la máxima remoción de la DQO en las aguas residuales del camal de Chota. El gráfico 5, se divide en dos regiones, la región debajo del 50 % donde las interacciones de los factores presentan coeficientes negativos y la región sobre el 50 % donde los factores e interacciones presentan coeficientes positivos. Los factores e interacciones que se encuentran alejados de la línea son significativos, mientras que los factores e interacciones sobre la línea, corresponden a un estimado de los errores de los efectos, siendo de baja significancia. Los valores

positivos de los efectos indican que un aumento en sus niveles conlleva a un aumento en el porcentaje de remoción de DQO. Por el contrario, los valores negativos de los efectos, conducen a una disminución del porcentaje de remoción de DQO cuando sus niveles son aumentados, ello queda establecido en el modelo matemático, quedando clara la relación que debe existir entre contaminantes y cantidades óptimas del reactivo de Fenton para la viabilidad económica.

Del gráfico 5 y la tabla 16 puede establecerse que el pH es el factor más significativo del todo el proceso, seguido por la interacción molecular del sulfato ferroso y su dependencia del pH, y finalmente el peróxido de hidrógeno. Los valores positivos de sus coeficientes en la ecuación de regresión al modelo ajustado expresa la importancia que tienen sobre el porcentaje de remoción de DQO. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal para los residuos de 2,0318, dicho valor hace referencia de que los datos no están muy dispersos y el modelo de regresión propuesta es aceptable. El error absoluto de la media es alrededor de 1,4099 que es el promedio del valor de los residuos, cuyo valor es relativamente pequeño, lo que representa que el error de pronóstico es aceptable. El estadístico Durbin-Watson examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en los datos. Puesto que el P-valor es superior a 0,05; no hay indicios de correlación de serie en los residuos. De lo expresado anteriormente queda establecido que el pH es el factor de gran importancia para el

buen desempeño del proceso Fenton seguido por la adecuada dosificación de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno.

La tabla 17 muestra el porcentaje de remoción de la DQO en función del tiempo, al inicio del proceso la remoción es relativamente lenta, sin embargo conforme avanza el tiempo la remoción de DQO se hace más eficiente hasta un porcentaje máximo de remoción alrededor del 79,93 % cuyo valor es muy próximo al predicho en la tabla 15.

Con los valores cinéticos de degradación de las aguas residuales, descritas en las tabla 17 se probaron las cinéticas de orden cero, primer y segundo orden. Los análisis de regresión aplicados a los diferentes órdenes de reacción analizados muestran un R-cuadrado ajustado a los grados de libertad muy cercanos entre sí para las cinéticas de orden cero y primer orden (96,14 % y 96,19 %) como se puede apreciar en las tablas ANOVA 4.8, 4.9 además se observan que los P - valores en las tablas señaladas es inferior a 0,01 lo que indica que existe un relación significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %. Mediante el estadístico Durbin-Watson aplicado para cada orden cinético analizado se puede verificar que el P - valor es superior a 0,05 por lo tanto no hay indicios de correlación de serie en los residuos. De los gráficos 6, 7, 8 se puede visualizar el comportamiento cinético de degradación de las aguas residuales del camal de Chota, donde las correlaciones de linealización advierten que la cinéticas de orden cero, primer orden son muy cercanas, no siendo así la de segundo orden, sin embargo la elección se realizó en

base al estadístico de regresión que proporciona mayor porcentaje de ajuste a la recta.

De lo expuesto se puede determinar que los modelos cinéticos de remoción de DQO de las aguas residuales del camal de Chota se rigen por un comportamiento de un primer orden, pero es difícil asegurar con certeza que dichas reacciones homogéneas sean intrínsecamente de primer orden ya que el orden cero está muy próximo, ello nos permite inferir que los contaminantes aún presentes en la muestra están a una concentración relativamente alta lo que hace difícil detectar con seguridad la dependencia de la velocidad con respecto a la concentración por lo que es muy probable que el comportamiento cinético sea de un orden cero aparente o pseudo primer orden (Smith 1991). Otro punto importante a mencionar es que la aguas residuales del camal de Chota es una mezcla compleja de sustancias contaminantes lo que complica aún más determinar con claridad el comportamiento cinético, sin embargo sería factible hacer un estudio cinético parcial de algunos de los componentes contaminantes del agua residual para tener un indicador del efecto promedio de las concentraciones sobre la velocidad de reacción, pero tal punto no se ha estudiado en el presente trabajo. (Nichela 2012).

Dadas las condiciones óptimas del proceso Fenton para degradar las aguas residuales es muy probable que funcionen dos mecanismos de reacción basado en la abstracción de hidrógeno y adición radicalaria como se muestran en las ecuaciones (18) y (21).

La tabla 21 indica los valores del proceso Fenton optimizado siendo el valor máximo de remoción alcanzado de 79.83%, que es un valor muy cercano al predicho, lo que supone que la reacción de degradación se llevó a cabo con la mínima generación de reacciones improductivas lo que se observó en una mejoría de la calidad de las aguas residuales después del tratamiento optimizado de la reacción de Fenton, tal como está expresado en la tabla 22 que comparando con la tabla 11 que contiene la composición fisicoquímica inicial, se puede verificar una mejora sustancial en varios parámetros medidos, como la remoción de la DBO y la DQO en un 75 % y 79,93%, dureza y alcalinidad en un 80 % y 96 %, y sólidos totales disueltos en un 87%. Así mismo la turbidez mejoró en un 97 % y la cantidad de oxígeno disuelto mejoró en un 85%. Así también hubo un incremento en la conductividad del 74 %. El medio ácido en que se desarrolla en proceso Fenton, favorecen la disminución de la dureza y alcalinidad, por la disminución de la iones carbonatos reduciendo el efecto tampón y la fuerza iónica e la solución. Otro parámetro favorecido que por el cambio de pH es la turbidez se incentiva la floculación y precipitación de materia coloidal mejorando la turbidez de las aguas residuales.

Con respecto a la conductividad el incremento se explica por la adición de ácido y sales de hierro para alcanzar condiciones óptimas del proceso Fenton, que a pesar de ser removida en forma de lodos, iones en solución hacen que la conductividad aumente. Como se puede apreciar el proceso Fenton se muestra prometedor para el tratamiento de aguas residuales de camales, ya que los parámetros

físicoquímicos iniciales fueron mejorados en su mayoría, y en el especial la DBO y la DQO que se encuentran dentro de los rangos establecidos para vertimiento en la red de alcantarillado (ver tabla 1) observándose una mejora en el índice de biodegradabilidad (tabla 24).

En cuanto al análisis microbiológico presuntivo de microorganismos, después del tratamiento Fenton, la tabla 23 indica crecimiento negativo en placas petri conteniendo agar selectivo y diferencial, por lo que se sospecha que el proceso Fenton también es capaz de destruir microorganismos en aguas residuales, sin embargo para confirmar la sospecha se requieren de análisis microbiológicos más específicos lo cual no es objeto del presente estudio.

La tabla 24 muestra el análisis para la DQO y la data para la prueba de hipótesis, se verifica que hay 7 y 4 grados de libertad donde el  $F_{\alpha}$  se obtiene en las tablas de puntos críticos al 5 % de la distribución F de Fisher observándose un efecto positivo en la remoción de la DQO. De la prueba de hipótesis efectuada para los tres factores principales del proceso Fenton aplicadas para el tratamiento de las aguas residuales del camal de Chota, se puede verificar que el pH, el peróxido y la interacción sulfato ferroso – sulfato ferroso tienen un efecto positivo en la remoción de la DQO cuando se aplica la dosificación correcta de los factores estudiados.

Las tablas 25, 26, 27, y las gráficas 9, 10, 11 esbozan las pruebas de rangos múltiples efectuadas las que permiten interpretar cuales medias son significativamente diferentes de otras a partir de los valores de las medias globales. La tabla 27 muestra un P – valor del

test de F inferior a 0,05 lo que indica que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias a un nivel de confianza del 95 %. Sin embargo ello no ocurre en las tablas 25 y 26.

En la tabla 25 se indica que los valores de la media para 1250 mg/L y 2500 mg/L, 2500 mg/L y 1875 mg/L de  $\text{FeSO}_4$  son relativamente cercanos y se presentan como grupos homogéneos es decir no presentan diferencias estadísticamente significativas durante el proceso de remoción de DQO. La interacción de 1250 mg/L - 1875 mg/L muestra una diferencia significativa para el  $\text{FeSO}_4$ , la que se interpreta como interacciones con poco efecto sumatorio sobre el porcentaje de remoción de la DQO, es decir se alejan de un proceso de remoción aceptable. Por otro lado las interacciones de 1250 mg/L - 2500 mg/L y 1875 mg/L - 2500 mg/L del  $\text{FeSO}_4$  no presentan diferencias significativas, es decir estas concentraciones comparten similitudes sobre el porcentaje de remoción de la DQO. El gráfico 9 muestra la media sobre el porcentaje de remoción de la DQO en aguas residuales del camal de Chota con respecto al  $\text{FeSO}_4$ , donde se puede apreciar las similitudes alcanzadas en el porcentaje de remoción de la DQO para las concentraciones 1250 mg/L y 2500 mg/L, 1875 mg/L y 2500 mg/L que se clasifican como grupos homogéneos.

La tabla 26 presenta los valores de medias para las concentraciones de  $\text{H}_2\text{O}_2$  utilizado, se aprecia que para las concentraciones de 800 mg/L, 1000 mg/L y 1200 mg/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$  las medias son similares y se muestran como un grupo homogéneo y no presentan diferencias



estadísticamente significativas durante el proceso de remoción de DQO. Las interacciones 800 mg/L – 1000 mg/L y 800 mg/L – 1200 mg/L y 1000mg/L – 1200 mg/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no muestran diferencia significativa alguna es decir estas concentraciones comparten similitudes sobre el porcentaje de remoción de la DQO. El gráfico 10 presenta la media sobre el porcentaje de remoción de la DQO con respecto al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, donde se puede observar las similitudes alcanzadas en el porcentaje de remoción de la DQO para las concentraciones 800 mg/L, 1000 mg/L y 1200 mg/L, las que se clasificó como grupos homogéneos.

La tabla 27 muestra los valores de las medias para los pH usados durante la aplicación del proceso Fenton. Se puede visualizar que para los pH 3,0 y 3,5 las medias son muy cercanas, es decir se muestran como grupos homogéneos y no presentan diferencias estadísticamente significativas durante el proceso de remoción de DQO. Las interacciones 2,5 – 3,0 y 2,5 y 3,5 muestran una diferencia estadísticamente significativa, lo que se interpreta como interacciones que ejercen poco efecto sobre el porcentaje de remoción de la DQO, lo que supone que el proceso se aleja de una remoción de la DQO exitosa. Sin embargo un pH de 3,0 – 3,5 no presenta ninguna diferencia significativa, por lo que se entiende que comparten similitudes sobre el porcentaje de remoción de la DQO. En el gráfico 11 se observa las similitudes alcanzadas en el porcentaje de remoción de la DQO para los valores de pH 3,0 y 3,5 las que se clasifican como grupos homogéneo

## CONCLUSIONES

- 1.- Las muestras de las aguas residuales del camal de Chota indicaron características fisicoquímicas muy por encima de lo establecido en la normativa peruana ( $DBO = 1874 \text{ mgO}_2/\text{L}$ ,  $DQO = 4654,4 \text{ mgO}_2/\text{L}$ ), cuyo IB es 0,403 clasificándola como una agua residual parcialmente biodegradable. Además mediante análisis microbiológico cualitativo se detectó la presencia de microorganismos entéricos lo que refleja el nivel de contaminación que sufren las aguas de la quebrada Colpamayo,
- 2.- El análisis de la aplicación del proceso Fenton en aguas residuales del camal de Chota mediante la metodología de superficie de respuesta indican que las concentraciones óptimas de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno es de  $2110,55 \text{ mg/L}$  y  $1092.67 \text{ mg/L}$  a un pH óptimo de 3.22 para un tiempo contacto de 18 minutos observándose una excelente mejora en el color y olor, mejora en el IB a 0,5 y eventual eliminación microbiana por lo que es factible aplicarlo como pretratamiento.
- 3.- La cinética de degradación muestra que el porcentaje de la remoción de la DQO mediante proceso Fenton sigue un comportamiento de 1° orden. Se determinó dicho orden basado en el factor de correlación de las gráficas respectivas utilizando el software Statgraphics 5.1 plus.
- 5.- No hay un mecanismo de reacción definido para el proceso Fenton ya que en él se suscitan complejas reacciones químicas que hasta la fecha es motivo de controversia entre investigadores, sin embargo de acuerdo a las condiciones óptimas dadas es muy probable que los mecanismos que pudieran estar

desarrollándose durante la reacción Fenton sean mecanismos de abstracción de hidrógeno y de reacción radicalaria.

## RECOMENDACIONES

- 1.- Durante las pruebas experimentales se recomienda trabajar bajo una campana de extracción porque los olores que presentan las aguas residuales de camales son muy fuertes debido a la presencia de sustancias volátiles y puede representar un riesgo para la salud.
- 2.- Se recomienda hacer pruebas experimentales de aplicación del proceso Fenton a temperaturas entre 20 °C y 40 °C para verificar con qué valor óptimo de éste parámetro se puede trabajar para mejorar el tratamiento de las aguas residuales de camales ya que en la literatura existe cierta discrepancia respecto a la relación efectividad – temperatura.
- 3.- Para los análisis de DQO se debe asegurar la eliminación del peróxido de hidrógeno remanente de las alícuotas, si bien el peróxido de hidrógeno es una sustancia con características benignas, el calentamiento de la misma puede generar combustión espontánea que puede poner en riesgo de incendio el recinto de trabajo.
- 4.- Es recomendable realizar análisis de carbono orgánico total (COT) porque nos permitiría identificar más a fondo la formación y evaluación de los intermediarios de la reacción durante el proceso de degradación o mineralización.
- 5.- La dosificación óptima de los reactivos de Fenton para el tratamiento de aguas residuales es única para cada tipo de muestra de acuerdo a las condiciones ambientales, sin embargo los valores obtenidos en esta investigación puede usarse como punto de partida para otras investigaciones respecto al tema y en

otras condiciones, no sin antes recomendar la aplicación de pruebas preliminares.

- 6.- Con respecto a la cinética de la reacción es necesario estudiar con más detenimiento la dependencia de la velocidad con respecto a la concentración del reactivo de Fenton, para clarificar el orden de reacción que más se ajuste a las condiciones del proceso.
- 7.- Se recomienda efectuar un estudio minucioso en cuanto a la microbiología de las aguas de canales sobre todo después del tratamiento Fenton para dilucidar su efectividad en cuanto a eliminación microbiana.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- American Public Health Association. (1992). *Standar Methods for the examination of water and wastewater* (18° ed.). Washington.
- Antonin, V., Santos, M., García-Segura, S. y Brillas, E. (2015). Electrochemical incineration of the antibiotic ciprofloxacin in sulfate medium and synthetic urine matrix. *Water Res.*, *83*, 31 - 41.
- Arellano, J. (2002). *Introduccion a la Ingenieria Ambiental*. México: Alfaomega.
- Augustine, A., Malay, CH. y Shamsul, M. (2012). Fenton treatment of Chlorpyrifos, Cypermethrin and Chlorothalonil pesticides in aqueous solution. *Journal of Environmental Science and Technology*, *5*(6), 407 - 418.
- Barbusinski, K. (2009). Fenton reaction - controversy concerning the chemistry. *Ecological Chemistry and Engineering's*, *16*(3), 348 - 358.
- Barquín, L., Cuevas, G y Bernal, A. (2011). Tratabilidad fisicoquímica de lixiviados generados en el tiradero municipal de Guanajato. *Hacia la Sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 409 - 414.
- Becerra, L., Horna, M. y Barrionuevo, K. (2014). Nivel de contaminación en los efluentes provenientes de canales de la región de la Libertad. *Rev. Cuerpo Méd. HNAAA*, *7*(3), 23 - 26.
- Brillas, E., Martínez-Huitle, C. (2015). Dcontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Appl. Catal. & Environ.*, 166-167, 603-643.
- CAPRE, ANDESAPA, OPS/CEPIS y GTZ. (agosto de 1992). *Aguas residuales de mataderos y plantas procesadoras de carne*. San José: ATV.
- CHávez, E. (2006). *Construcción de dos celdas electroquímicas a escala laboratorio para la electrogeneración del reactivo de Fenton y para oxidación anódica*. Tesis maestra, UNAM, Programa de maestría y doctorado, México.
- Deng, Y. & Englehardt, J. (2006). Treatment of landfill leachate by the Fenton process. Review. *Water Research*, *40*, 3683 - 3694.
- Eckenfelder, W. (2001). *Industrial water pollution control*. México: Mc. Graw - Hill Companies, Inc.
- Escudero, S. (2012). *Tratamiento de lixiviados provenientes de un vertedero de residuos sólidos urbanos mediante aplicacion de sistemas fisicoquímicos a escala laboratorio*. tesis magistral, Universidad de Guanajuato, Guanajuato.

- 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. *Sep. Purif. Technol.*, 156(part 2), 655-664.
- García, J. (2007). *Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes removal*. Tesis PhD, Universitat Autònoma de Barcelona, Departament de Química, Barcelona.
- Gilpavas, E., Rojas, V., Casas, D. (2011). *Procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de residuos líquidos peligrosos procedentes de los laboratorios de ingeniería de procesos*. Cuaderno de investigación, Universidad EAFIT, Grupo de investigación de procesos ambientales y biotecnológicos, Medellín.
- González, M., Torres, T. y Chirolés, S. (2003). Calidad microbiológica en aguas costeras en climas tropicales. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 3(4), 44 - 54.
- Guzmán, J., Mosteo, R., Sarasa, J., Alba, J. y Ovelleiro, J. (2016). Evaluation of solar photo-Fenton and ozono based processes as citrus wastewater pre-treatments. *Separation and Purification Technology*, 164, 155 - 162.
- Jurado, J. (2009). *Degradación de un efluente textil real mediante proceso Fenton y Foto-fenton*. Tesis de máster, Universidad Politècnica de Catalunya, Catalunya, España.
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, 12(2), 58-69.
- Martínez, L., Hodaifa, G., Rodríguez, F., Giménez, J., Lozano, J. y MUÑOZ, A. (2010). Utilización de la Reacción Fenton en el tratamiento de aguas de lavado de aceite y aceitunas. (págs. 1 - 5). Granada: UNAPROLIVA.
- Méndez, R., García, R., Castillo, E. y Sauri, M. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *revista de Ingeniería e Investigación*, 30(1), 80 - 85.
- Muñoz, D. (2005). Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: Para una población menor de 2000 habitantes. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 3(1), 87 - 98.
- Nalinrut, M., Chien, W., Anotai, J. y Ming -Chun, L. (2011). Factors affecting degradation of o - toluidine by Fenton process. *Sustain. Environ. Res.*, 21(2), 101 - 107.
- Neyens, E. y Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *J. Hazard. Mater.*, 33-50.
- 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 Nacional de la Plata, La Plata.

- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Lima.
- Ortiz, G. (2009). *Descontaminación de aguas por medio de la reacción Foto-fenton heterogénea*. tesis doctoral, Universidad Nacional del Litoral, Facultad de ingeniería química, Santa Fe, Colombia.
- Primo, O. (2008). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertederos de RSU mediante procesos de oxidación avanzada*. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería química y química inorgánica, Cantabria - España.
- Quille, G. y Donayre, T. (2013). Tratamiento de efluentes líquidos y sólidos del camal municipal de llave. *Rev. Investig. Altoandin.*, 15(1), 65 - 72.
- Rivas, F., Beltrán, F., Gimeno, O. y Carvalho, F. (2003). Fenton like oxidation of landfill leachate. *Journal of Environmental Science and Health, part A-toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, A38(2), 371-379.
- Rodríguez, R., Espada, J., Pariente, M., Melero, J., Martínez, F. y Molina R. (2016). Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogeneous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 124, 21 - 29.
- Ronzano, E., Dapena, J. . (1995). *tratamiento Biológico de las aguas residuales*. Madrid: Diaz y Santos.
- Salas, C. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (Reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30 - 38.
- Salas, G. y Condorhuamán, C. (2008). Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. *Rev. Per. Quim. Ing°*. *Quim.*, 11(1), 29 - 35.
- Sánchez, F. (2007). *Tratamiento combiandos físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera*. Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, Ingeniería química y química física, Extremadura.
- Smith, J. (1991). *Ingeniería de la cinética química* (sexta edición ed.). México: Mc - Graw - Hill.
- Solarte, Y. Peña, M. y Madera, C,. (2006). Transmisión de protozoarios patógenos a través del agua para consumo humano. *Colombia Médica*, 37(1), 75-82.
- Sun, S., Zeng, X., y Li, C. (2014). Lemley, Enhanced heterogeneous and homogeneous Fenton-like degradation of carbamazepine by nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with nitrilotriacetic acid. *Chem. Eng. J.*, 44-49.
- Sundararaman, T., Ramamurthi, V. y Partha, N. (2009). Decolorization and COD removal of reactive yellow 16 by Fenton oxidation and comparison of dye removal with photo Fenton and Sono Fenton process. *Moder applied Science*, 3(8), 15 - 22.



- Vogel, I. (1974). *Química analítica cualitativa* (5° ed.). Buenos Aires, Argentina: Kapelusz.
- Zazou, H., Oturán, N., Sonmez-Celebi, M., Hamdani, M. y Oturán, M. (2015). Study of degradation of the fungicide imazalil by electr-Fenton process using platinum and boron-doped diamond electrodes. *J. Mater. Environ. Sci.*, 6, 107-113.
- Zazouli, M., Yousefi, Z., Eslami, A. y Ardebilian, M. (2012). Municipal solid waste landfill leachate treatment by Fenton, Photo-fenton and Fenton - Like Processes: Effect of some variables. *Iranian Journal of Environmental Health Science&Engineering*, 9(3), 1 - 9.
- Zgajnar, A., Zagorc, J. y Cotman, M. (2011). Fenton's oxidative treatment of municipal landfill leachate as an alternative to biological process. *Desalination*, 275, 269 - 275.

## **ANEXOS**

**ANEXO 01**

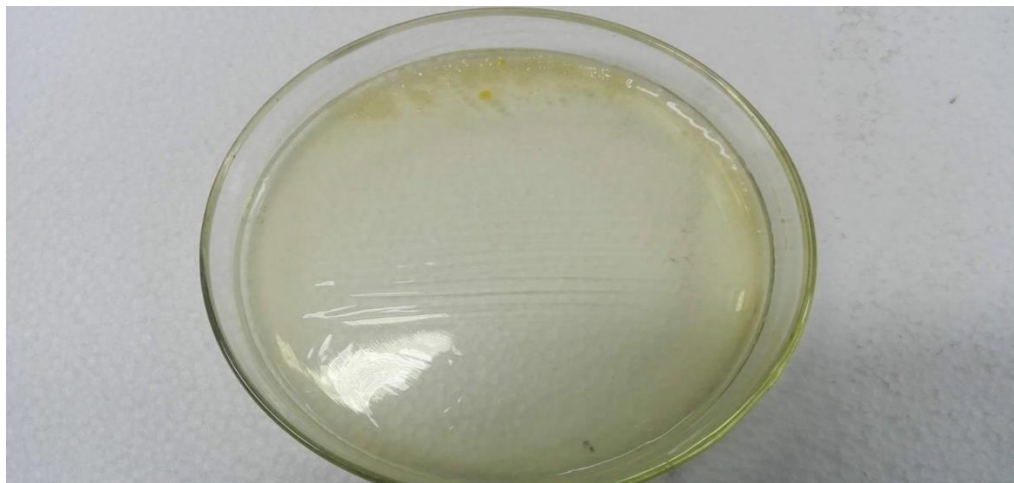
Cantidad de animales sacrificados por tipo en el camal municipal de Chota en el mes de mayo del 2017

**ANEXO 02**

Identificación de bacterias en las aguas residuales del camal de chota antes y después de la aplicación del proceso Fenton

## IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL DE CHOTA ANTES DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO FENTON

### AGAR NUTRITIVO



Prueba general para demostrar la presencia de microorganismos en  $10^{-1}$  de la muestra inicial de agua residual del camal de Chota

### AGAR Mc. CONKEY

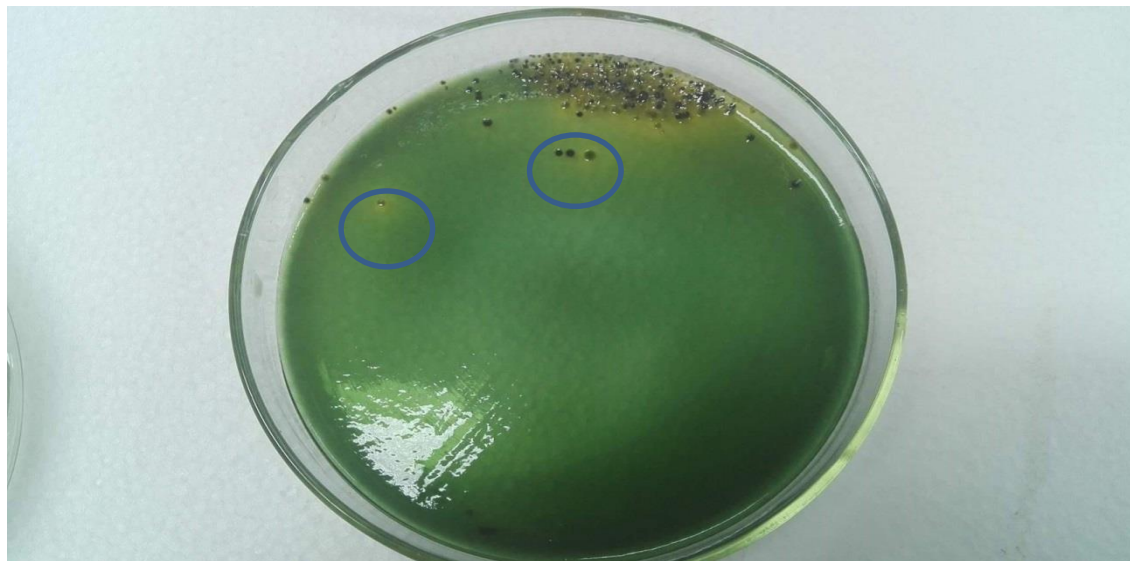
Aislamiento de enterobacterias en  $10^{-1}$  de la muestra inicial de agua residual



Crecimiento de bacterias lactosas positivas, indicativo de presencia de enterobacterias. (Colonias rojas)

**Agar TCBS**

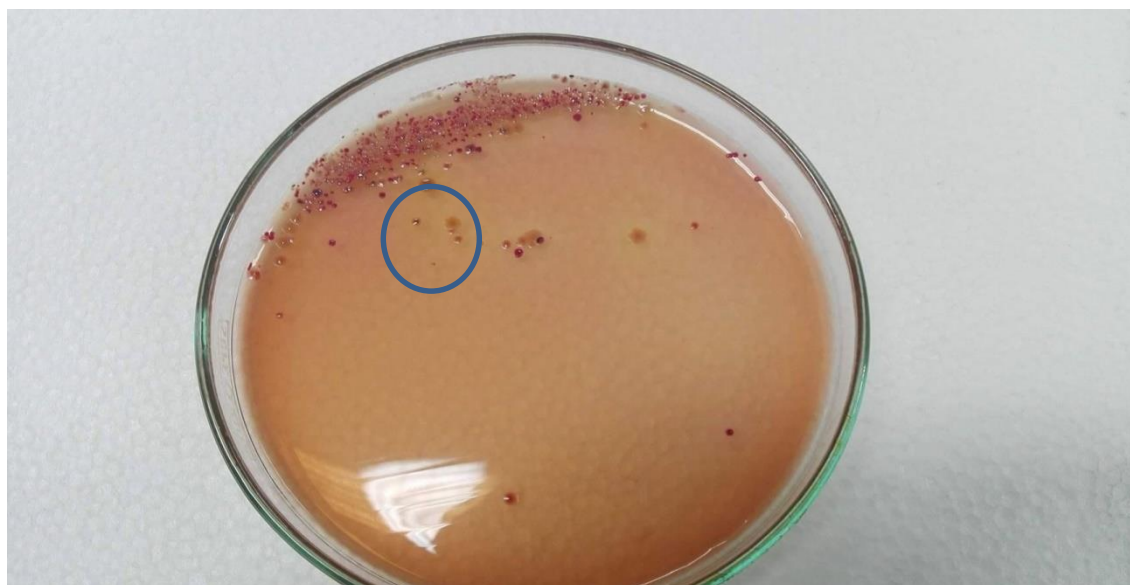
Aislamiento de Vibrio en  $10^{-1}$  de la muestra inicial



Se observó los dos tipos de Vibrio (Vibrio Cholera con una presencia amarillenta y Vibrio parahaemolyticus con presencia oscura. (Colonias amarillentas y amarillo oscuro en el centro forman halo de color amarillo).

**Agar SS:**

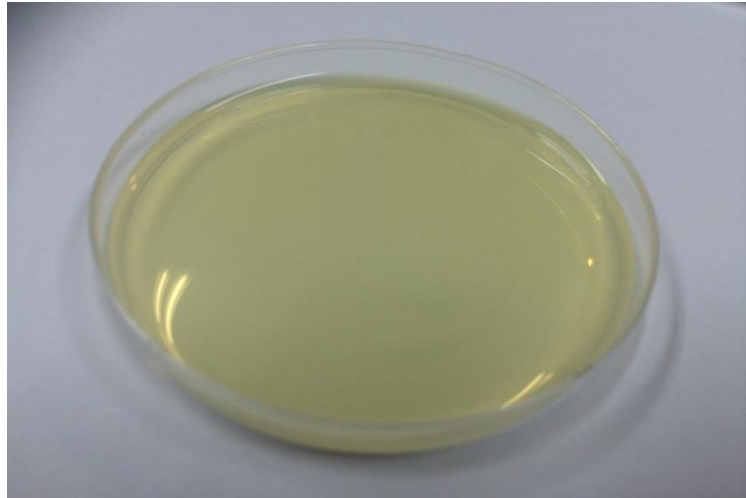
Aislamiento de Salmonella y Shigella en  $10^{-1}$  de la muestra inicial



Colonias transparentes, indicativo de presencia de Salmonella y Shigella. (Verde negro en el centro dando la apariencia de un ojo de pescado)

**IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL  
DE CHOTA DESPUES DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO FENTON**

**AGAR NUTRITIVO:** crecimiento negativo.



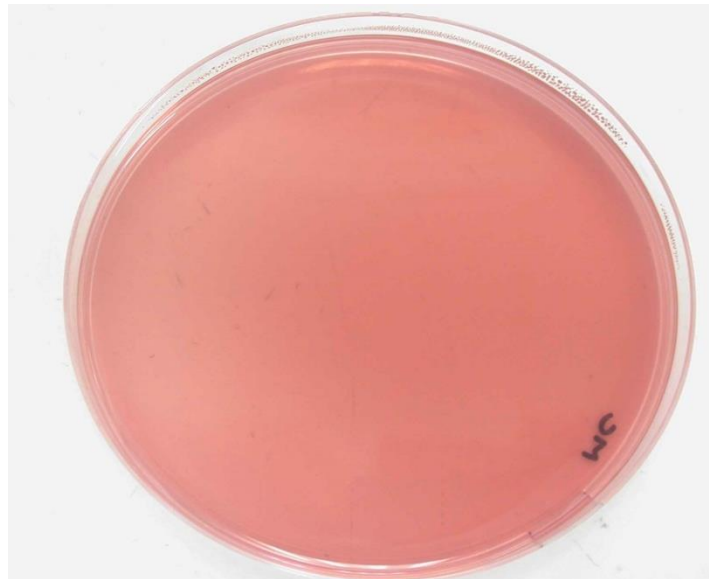
**AGAR Mc. CONKEY:** crecimiento negativo



**AGAR TCBS:** crecimiento negativo



**AGAR SS:** crecimiento negativo





ANEXO 3

Equipos de laboratorio empleados en el desarrollo del proyecto

### ESPECTROFOTOMETRO UV-VIS



### EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS



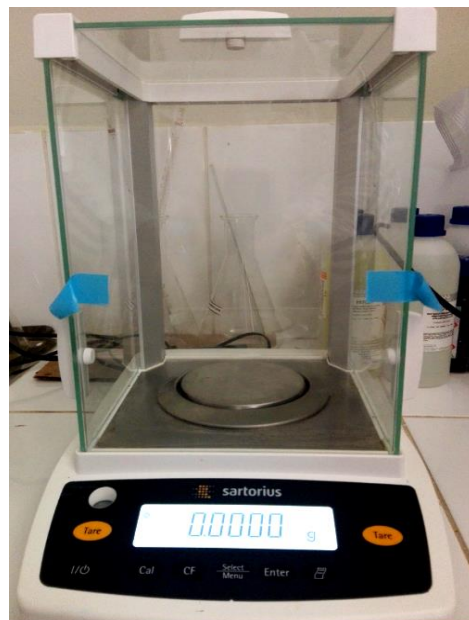
### COCINA CON AGITACION ELECTROMAGNETICA



EQUIPO PARA PRUEBA DE DBO<sub>5</sub>



BALANZA ANALITICA



MICROSCOPIO



TERMOREACTOR



## ANEXO 4

Evidencias fotográficas durante el desarrollo del proyecto

Toma de muestras en el camal de Chota



Ajuste de pH para la reacción de Fenton



Calculo del tiempo óptimo de reacción de Fenton

