



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

DIRECCIÓN DE CARRERA: MEDIO AMBIENTE

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
EN MEDIO AMBIENTE**

**MODALIDAD:
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:
EVALUACIÓN DE FILTRO PERCOLADOR A ESCALA PILOTO
PARA LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE
RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO, CALCETA-
BOLÍVAR**

**AUTORES:
MENDOZA ORTEGA KELLY KATHERINE
ROCA MANCILLA JOSÉ MAXIMINO**

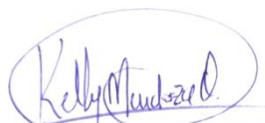
**TUTOR:
ING. JOSÉ MANUEL CALDERÓN PINCAY, Mg. Sc.**

CALCETA, FEBRERO 2021

DERECHO DE AUTORÍA

Yo **Mendoza Ortega Kelly Katherine**, con cédula de ciudadanía 131694266-1 y **Maximino José Roca Mancilla**, con cédula de ciudadanía 131673191-6 declaran bajo juramento que el Trabajo de Titulación titulado: **EVALUACIÓN DE FILTRO PERCOLADOR A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO, CALCETA-BOLÍVAR** es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, concedemos a favor de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, conservando a mi favor todos los derechos patrimoniales de autor sobre la obra, en conformidad con el Artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación.



KELLY K. MENDOZA ORTEGA



MAXIMINO J. ROCA MANCILLA

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. José Manuel Calderón Pincay, Mg, certifica haber tutelado el proyecto **EVALUACIÓN DE FILTRO PERCOLADOR A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO, CALCETA-BOLÍVAR**, que ha sido desarrollada por Kelly Katherine Mendoza Ortega y Maximino José Roca Mancilla, previo a la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.



Ing. José Manuel Calderón Pincay, Mg

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos APROBADO el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DE FILTRO PERCOLADOR A ESCALA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO, CALCETA-BOLÍVAR**, que ha sido propuesto y desarrollado por Kelly Katherine Mendoza Ortega y Maximino José Roca Mancilla, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN DE LA UNIDAD DE TITULACIÓN ESPECIAL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.



Q.F. PATRICIO J. NOLES AGUILAR, M. Sc.
MIEMBRO



ING. SERGIO ALCÍVAR PINARGOTE M. Sc
MIEMBRO



ING. FABRICIO ALCÍVAR INTRIAGO, M. Sc
PRESIDENTE

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo investigativo lo expreso principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza, quien, con su bendición, llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, por confiar, abrirme las puertas y permitirme realizar todos los procesos investigativos durante la carrera dentro de su establecimiento educativo.

De igual manera, mis agradecimientos a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

LOS AUTORES

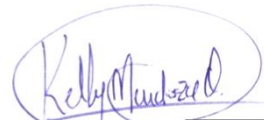
DEDICATORIA

Esta tesis está principalmente dedicada:

A mis padres Jaqueline Ortega y Juan Mendoza quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mis hermanos David y Kelvin, y a Luis David Cajas por su cariño y apoyo incondicional, que, durante todo este proceso, estuvieron conmigo en todo momento gracias.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.



Kelly Katherine Mendoza Ortega

DEDICATORIA

Esta tesis está principalmente dedicada:

A mis padres Rogina De Jesús y José Maximino quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre para seguir adelante con mi profesionalismo.

A mis hermanos Gabriela y Gabriel, y a Manuel por su cariño y apoyo incondicional, que, durante todo este proceso, estuvieron conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

De manera especial a Katherine Domínguez, por haber estado conmigo, apoyándome todo momento para cumplir mis sueños ¡Gracias!



José Maximino Roca Mancilla

CONTENIDO GENERAL

DERECHO DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
CONTENIDO GENERAL.....	viii
CONTENIDO DE CUADROS, GRÁFICOS Y FIGURAS	x
RESUMEN.....	xii
PALABRAS CLAVE	xii
ABSTRACT.....	xiii
KEYWORDS.....	xiii
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.4. HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. CENTRO DE FAENAMIENTO.....	5
2.2. AGUAS RESIDUALES DE CENTROS DE FAENAMIENTO.....	5
2.3. MEDICIONES DE CAUDALES PARA MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES	10
2.4. MUESTREO DE AGUAS RESIDUALES	10
2.5. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.....	11
2.6. FILTROS PERCOLADORES.....	13
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	25
3.1. UBICACIÓN	25
3.2. DURACIÓN	25
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS	25
3.4. VARIABLES A MEDIR.....	26
3.5. PROCEDIMIENTO	27
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1. FASE 1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE RESIDUAL PROCEDENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA.....	32
4.2. FASE 2. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA, A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO CON SISTEMA DEL FILTRO PERCOLADOR	34

4.3. FASE 3. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA Y VIABILIDAD TÉCNICA– ECONÓMICA DEL FILTRO PERCOLADOR EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO	39
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
5.1. CONCLUSIONES	41
5.2. RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS	51

CONTENIDO DE CUADROS, GRÁFICOS Y FIGURAS

CONTENIDO DE CUADROS

Cuadro 2.1. Composición agua residual de un Centro de faenamiento.	7
Cuadro 2.2. Composición agua residual de un centro de faenamiento.	7
Cuadro 2.3. Tabla 8: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.	12
Cuadro 2.4. Materias primas para preparación de agua sintética.	23
Cuadro 2.5. Criterios para parámetros de diseño de filtro percolador lento con medio filtrante rocoso.	23
Cuadro 2.6. Parámetros de rellenos comunes de filtros percoladores.	23
Cuadro 3.1. Parámetros físico químicos analizados del agua residual.	28
Cuadro 4.1. Parámetros físico químicos analizados.	33
Cuadro 4.2. Especificaciones consideradas en el diseño del sistema de filtro percolador.	34
Cuadro 4.3. Nivel de carga orgánica del filtro percolador.	35
Cuadro 4.4. Formación de la biopelícula.	35
Cuadro 4.5. Parámetros físico químicos analizados comparados con los LMP de descarga de efluentes al sistema de alcantarillado del TULSMA (2015).	38
Cuadro 4.6. Resumen de la estimación de costos para el filtro percolador a escala piloto.	40

CONTENIDO DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Medición del caudal efluente del centro de faenamiento de Calceta.	32
Gráfico 4.2. Mediciones de pH durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.	36
Gráfico 4.3. Mediciones de DBO5 y DQO durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.	37
Gráfico 4.4. Eficiencia en la remoción de niveles de parámetros físico-químicos analizados.	39

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de flujo de la configuración experimental: filtro de goteo de escala piloto.	22
Figura 3.1. Ubicación del centro de faenamiento de la ciudad de Calceta.	25

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar un filtro percolador a escala piloto para la remoción de carga orgánica del efluente residual del centro de faenamiento de Calceta. Se desarrolló en tres etapas: 1) Caracterizar el efluente residual procedente del centro de faenamiento de Calceta; 2) Analizar la eficiencia y viabilidad técnica–económica del filtro percolador en la remoción de carga orgánica del efluente del centro de faenamiento. Se aplicó métodos cuantitativos donde se hizo uso de mediciones de caudales y análisis cuantitativos a parámetros que indican la calidad del agua residual pre y post tratamiento. En la caracterización se estudió un caudal promedio de 9,15 m³/día de agua residual; siendo los días 5 y 12 (viernes) los que generan un mayor nivel de producción. La mayoría de parámetros, a excepción del pH (7,06) no se ajustan a los LMP, tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A. El tratamiento de agua residual, a través del filtro percolador, determinó una mejor calidad y ajuste a los criterios de calidad de agua contemplados en la normativa ambiental ecuatoriana; en comparación con los niveles iniciales. El filtro percolador tuvo una eficiencia alta en la remoción de carga orgánica (90,40% para DQO y 79,40% para DBO₅). Además, económicamente los costos para tratar 1m³ de agua residual son bajos. Se acepta la idea a defender de la investigación; demostrando que el filtro percolador es viable técnica y económicamente para el tratamiento de aguas residuales procedentes del centro de faenamiento de Calceta.

PALABRAS CLAVE

Filtro percolador, remoción de carga orgánica, agua residual de centro de faenamiento, parámetros de calidad.

ABSTRACT

The research was aimed at evaluating a pilot-scale trickling filter for the removal of organic load from the residual effluent of the Calceta slaughterhouse. It was developed in three stages: 1) Characterize the residual effluent from the Calceta slaughterhouse; 2) Analyze the efficiency and technical-economic feasibility of the trickling filter in the removal of organic load from the slaughterhouse effluent. Quantitative methods were applied where flow measurements and quantitative analyses were used for parameters that indicate the quality of the pre and post treatment wastewater. In the characterization, an average flow of 9.15m³/day of wastewater was studied; days 5 and 12 (Friday) being the ones that generate a higher level of production. Most parameters, with the exception of pH (7.06), do not comply with the MSL, Table 8 of Ministerial Agreement 097-A. The treatment of waste water, through the percolator filter, determined a better quality and adjustment to the criteria of water quality contemplated in the Ecuadorian environmental regulations; in comparison with the initial levels. The trickling filter had a high efficiency in the removal of organic load (90.40% for COD and 79.40% for BOD). In addition, economically the costs to treat 1m³ of wastewater are low. It is accepted the idea to defend from the investigation; demonstrating that the trickling filter is technically and economically viable for the treatment of waste water coming from the Calceta slaughterhouse.

KEYWORDS

Trickling filter, organic charge removal, wastewater from the slaughterhouse, quality parameters.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento de la población mundial ha aumentado la contaminación del agua dulce debido a la descarga inadecuada de residuales, especialmente en los países en desarrollo (Krishna *et al.*, 2009). Por esta razón, el tratamiento de aguas residuales es crucial para el desarrollo continuo de la sociedad. Además, los estándares para la descarga de efluentes cada vez son más estrictos en todo el mundo; lo que hace necesario el desarrollo de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales (Environment Canadá, 2012).

La industria de la carne consume el 29% del total de agua dulce utilizada por el sector agropecuario, en todo el mundo (Gerbens *et al.*, 2013). Además, la producción mundial de carne de res, cerdo y aves de corral se ha duplicado en la última década y se prevé que crezca de manera constante hasta 2050. Por lo tanto, el número de instalaciones de centros de faenamiento está aumentando; lo que resulta en un mayor volumen de aguas residuales a tratar (Valta *et al.*, 2015).

Los centros de faenamiento en sus diferentes etapas: procesamiento, sacrificio, sangrado, escaldado, evisceración, almacenamiento y envasado producen una cantidad importante de aguas residuales que suelen contener cantidades considerables de Fósforo Total, Nitrógeno Total, Carbono Orgánico Total, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Grasas (Benavides, 2013; Bustillo y Mehrvar, 2015). Asimismo, también pueden ser una fuente importante de microorganismos, incluidos patógenos potenciales (Eryuruk *et al.*, 2018). Las grasas ocasionan problemas de flotación de lodos, mientras que los compuestos lignocelulósicos presentan resistencia al ataque bacteriano, siendo retenidos en los sistemas ante la dilución de la biomasa activa (Al-Mutairi *et al.*, 2008).

Las aguas residuales de centros de faenamiento están clasificadas como una de las aguas más perjudiciales para el medio ambiente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) porque la eliminación inadecuada de éstas, es una de las razones de la desoxigenación de los ríos y la contaminación

de las aguas subterráneas (US EPA, 2004). Por lo tanto, las aguas residuales de centros de faenamiento requieren un tratamiento significativo para una liberación segura y sostenible al medio ambiente; convirtiéndose en una necesidad económica y de salud pública (Bustillo *et al.*, 2016).

El tratamiento de las aguas residuales generadas en los centros de faenamiento enfrenta problemas cruciales debido a los impactos acumulativos que éstas ocasionan a los cuerpos de agua dulce, especialmente en los países en desarrollo. La complejidad que implica el tratamiento de este tipo de aguas residuales varía, según la ubicación, los recursos económicos, el nivel de la calidad de vida y las propias características del efluente residual. Esto implica que la adopción de técnicas debe variar en los procesos de tratamiento de las aguas residuales provenientes de los centros de faenamiento (Davarnejad y Nasiri, 2017).

Los efluentes constituyen una de las más serias causas de contaminación ambiental, malos olores y daños a la salud (Félix y Rikeros, 2015). Teniendo en cuenta este escenario, surge la necesidad de desarrollar alternativas de tratamiento de las aguas residuales que mitiguen su impacto contaminante para la preservación del ambiente, cuidar el recurso hídrico y proteger así la salud pública. En el tratamiento del agua residual existe una gran variedad de métodos, entre los más utilizados están los filtros percoladores.

De acuerdo a un estudio sobre control de impactos ambientales de los centros de faenamiento de la zona central de Manabí, el inadecuado manejo de los canales y vertidos es un problema recurrente. Es por ello, que están en constante contaminación; exponiendo la salud del consumidor, el bienestar de la biodiversidad, emisión de malos olores, entre otros (Sánchez y Molina, 2015). En el cantón Bolívar, los habitantes cercanos al centro de faenamiento municipal expresan molestias asociadas a procesos productivos y a la mezcla de los residuos, sin un tratamiento controlado en las instalaciones.

Por lo tanto, considerando antecedentes de estudios relacionados a este tema y lo expuesto, se plantea la siguiente interrogante:

¿Cómo la implementación de un filtro percolador a escala piloto disminuirá la carga orgánica de los efluentes residuales del centro de faenamiento de Calceta, cantón Bolívar?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Con este estudio se pretende encontrar una solución viable para controlar y optimizar la calidad de aguas residuales provenientes del centro de faenamiento de Calceta; ajustándose a las normas nacionales del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2015). Adicionalmente, permitirá la generación de precedentes para potenciar el uso y medidas de control a través de sistemas de tratamiento de aguas residuales de los centros de faenamiento. Asimismo, se busca gestionar en estos espacios una medida de control que les ayude al desarrollo comunitario local y que en el futuro se convierta en una guía para la planificación integrada de estos centros.

La investigación también se encuentra enmarcada dentro de los Objetivos 3 y 7 del Plan Nacional para el buen vivir que establecen: “Mejorar la calidad de vida de la población” y “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable”, respectivamente (SENPLADES, 2017).

El aspecto más importante a destacar es que el estudio pretende evaluar la eficiencia de un filtro percolador en la remoción de carga orgánica de las aguas residuales producidas en el centro de faenamiento de Calceta. El material filtrante a utilizar fue la piedra pómez que es respaldado científicamente por su eficiencia en la remoción de contaminantes (Kemal, 2016). La selección de esta tecnología consiste en su popularidad por su baja generación de lodos, la baja inversión de capital y el costo de mantenimiento y menor consumo de energía (Khan *et al.*, 2011).

Por estas razones, se sostiene que las aguas residuales a través del filtro, reducirán los niveles de carga orgánica; evitando la contaminación en los cuerpos de agua (subterránea y superficial) y en el suelo. Además, la población local también se beneficiará porque se salvaguardará la integridad de los recursos naturales disponibles.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar un filtro percolador a escala piloto para la remoción de carga orgánica del efluente residual del centro del faenamiento de Calceta.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el efluente residual procedente del centro de faenamiento de Calceta.
- Determinar la calidad del efluente residual del centro de faenamiento de Calceta, a través del tratamiento con sistema del filtro percolador.
- Analizar la eficiencia y viabilidad económica del filtro percolador en la remoción de carga orgánica del efluente del centro de faenamiento de Calceta.

1.4. HIPÓTESIS

El filtro percolador permitirá una eficiencia significativa (>50%) en la remoción de carga orgánica de aguas residuales procedentes del centro de faenamiento de Calceta.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. CENTRO DE FAENAMIENTO

Es el establecimiento dotado de instalaciones completas y equipo mecánico adecuado para el sacrificio, manipulación, preparación y conservación de animales de carnicería bajo varias formas con el aprovechamiento completo, racional y adecuado de los subproductos no comestibles (Ruiz, 2011). También se denomina centro de faenamiento a los establecimientos donde solamente se sacrifican y preparan los animales de abasto que están destinados al consumo humano y sometido a vigilancia sanitaria constante para velar por la salud pública. Los centros de faenamiento están dotados de instalaciones que facilitan el sacrificio y buen faenamiento de los animales (Bobenrieth *et al.*, 2015).

Los centros de faenamiento son parte de una gran industria, que es común en numerosos países del mundo donde la carne es una parte importante de su dieta. Por lo tanto, producen grandes volúmenes de aguas residuales debido al sacrificio de animales y la limpieza en instalaciones o en plantas de procesamiento de carne asociadas. Este sector utiliza el 24% del agua dulce total consumida por la industria de alimentos y bebidas (Bustillo y Mehrvar, 2015).

En otro estudio se ha encontrado que los centros de faenamiento consumen hasta el 29% del agua consumida por el sector agrícola en todo el mundo (Gerbens *et al.*, 2013). El World Bank Group (2007) clasificó a los centros de faenamiento como una instalación de procesamiento de carne que puede consumir entre 2,5 y 40 m³ de agua por tonelada de carne producida.

2.2. AGUAS RESIDUALES DE CENTROS DE FAENAMIENTO

Estas aguas residuales son consideradas como *perjudicial* en todo el mundo debido a su compleja composición de grasas, proteínas y fibras del proceso de sacrificio (Bustillo *et al.*, 2014). La composición varía significativamente según los diversos procesos industriales y la demanda específica de agua (Debik y Coskun, 2009). Aunque existen criterios para que este tipo de residual sea tratado, previamente a su descarga (Bustillo *et al.*, 2016), varias investigaciones

concluyen que este tema no está ampliamente disponible (Salminen y Rintala, 2002; Mittal, 2006; Arvanitoyannis y Ladas, 2008), y que más bien los estudios se centran en la caracterización de los microorganismos presentes (Franke e Insam, 2013).

La principal fuente de contaminación de las aguas residuales se origina de las heces y orina, pelusa, preparación de subproductos, almacenamiento de cueros, residuos de equipos, carnes y grasas, limpieza de los utensilios e instalaciones, alimentos no digeridos por los intestinos, las vísceras de los animales sacrificados y vapor condensado procedente del tratamiento de los despojos (Bustillo y Mehrvar, 2015). La mayor parte de la contaminación es causada por la sangre y el moco estomacal e intestinal (Tritt y Schuchardt, 1992). Cuando no se respeta las prácticas de limpieza, aumenta el número de coliformes y la carga orgánica en las aguas resultantes (Muñoz, 2012). El alto contenido de compuestos orgánicos y nutrientes se componen principalmente de proteínas, grasas y aceites (Palatsi *et al.*, 2011).

La cantidad de agua residual proveniente de los centros de faenamiento, sólo puede ser reducida mediante sistemas de recirculación o reutilización de aguas de refrigeración, mientras en procesamiento de carnes se logra reduciendo las cantidades de agua de limpieza, excepto cuando se tiene la separación y recuperación de grasas donde el agua es absolutamente necesaria (Jensen *et al.*, 2015).

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LOS CENTROS DE FAENAMIENTO

Las características comunes de las aguas residuales de centros de faenamiento se resumen en el cuadro 2.1. Varias investigaciones han descrito que estas aguas se evalúan en términos de parámetros generales debido a los volúmenes específicos y las cargas contaminantes relacionadas con los animales sacrificados y procesados (Cao y Mehrvar, 2011; Barrera *et al.*, 2012; Bustillo *et al.*, 2014). Este tipo de aguas, principalmente, contiene cantidades considerables de: fósforo total (PT), nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (COT),

demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Además, contienen altos niveles de microorganismos orgánicos, patógenos y no patógenos, y detergentes y desinfectantes utilizados para actividades de limpieza (Debik y Coskun, 2009). Las muestras de aguas residuales también incluyen nutrientes, metales pesados, color y turbidez, entre otros. También es importante tener en cuenta que los productos farmacéuticos para fines veterinarios pueden estar presentes en este residual (Tritt y Schuchardt, 1992).

Cuadro 2.1. Composición agua residual de un Centro de faenamiento.

Parámetro	Unidad	Rango	Media
PT	mg/L	70–1200	546,00
NT	mg/L	50–841	427,00
COT	mg/L	100–1200	546,00
DQO	mg/L	1250–15900	4221,00
SST	mg/L	300–2800	1164,00
DBO ₅	mg/L	610–4635	1209,00
Ph	---	4,90–8,10	6,95
Fosfato (PO ₄)	mg/L	20–100	25,00
Pentaóxido de difósforo (P ₂ O ₅)	mg/L	10–80	20,00
Potasio (K)	mg/L	0,01–100	90,00
Color	mg Pt/L	175–400	290,00
Turbidez	FAU	200–300	275,00

* FAU: Unidades de Atenuación de Formazin

Fuente: Bustillo y Mehrvar (2015).

Por su parte, Muñoz (2012) señala que cuando no se recolecta apropiadamente la sangre y los productos residuales, la carga orgánica puede ser dos o tres veces mayor a la reportada. En el cuadro 2.2 se detalla los niveles comunes en los parámetros de calidad de las aguas residuales de un centro de faenamiento.

Cuadro 2.2. Composición agua residual de un centro de faenamiento.

Parámetro	Unidad	Valor
Sustancias sedimentables	mg/l	10,00
pH	---	7,00
Sustancias no disueltas	mg/l	580,00
Sólidos fijos	mg/l	81,00
Sólidos volátiles	mg/l	498,00
Sustancias disueltas	mg/l	1206,00
Alcalinidad	mg ácido/l	7,00
Grasa	mg/l	108,00
Nitrógeno	mg/l	145,00

P ₂ O ₅	mg/l	19,00
Oxido de potasio (K ₂ O)	mg/l	29,00
Oxido de calcio (CaO)	mg/l	131,00
Consumo de KMnO ₄	mg/l	154,00
DBO ₅	mg/l	838,00

Fuente: Muñoz (2012)

2.2.2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CENTROS DE FAENAMIENTO

Entre los principales tratamientos para aguas residuales provenientes de centros de faenamiento, se destacan a los biológicos debido a que este tipo de residual contiene un alto nivel de contaminantes orgánicos y lo más viable es el uso de tecnologías que incorporen a microorganismos eficientes para degradar la materia orgánica presente en el agua (Aziz et al., 2019).

2.2.3. TRATAMIENTO ANAERÓBICO

La digestión anaeróbica es una técnica muy extendida en el tratamiento biológico de las aguas residuales provenientes de centros de faenamiento. Los compuestos orgánicos complejos se degradan con la ayuda de diversos grupos de microorganismos, principalmente bacterias, en ausencia de oxígeno mediante un digestor anaeróbico. La tasa de degradación depende directamente de la actividad de los microorganismos empleados (Kondusamy y Kalamdhad, 2014).

El proceso de degradación consiste en de cuatro pasos básicos consecutivos, a saber, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Mao et al., 2015). El producto final de una especie puede ser el sustrato deseado por otra, por lo que deben prevalecer las condiciones adecuadas dentro del digestor para obtener un producto final en forma de Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂) Amonio (NH₄), agua (H₂O) y Sulfuro de hidrógeno (H₂S) (Sreekrishnan et al., 2004).

Entre los principales tratamientos anaeróbicos para aguas residuales provenientes de centros de faenamiento se encuentran: Lagunas anaeróbicas, Reactor anaeróbico por contacto, Filtro anaeróbico/reactor anaeróbico de

biopelícula fija, Reactor anaeróbico de flujo ascendente de biopelícula de lodos; y Reactor anaeróbico secuencial por lotes (Aziz et al., 2019).

2.2.3.1. TRATAMIENTO AERÓBICO

La digestión aeróbica tiene lugar en presencia de oxígeno con la ayuda de un cultivo mixto de microorganismos heterótrofos y autótrofos. Los microorganismos heterótrofos utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono, mientras que los autótrofos consumen carbono inorgánico, como el CO₂. El consorcio aeróbico mixto degrada la materia orgánica y el amoníaco en compuestos más simples como: CO₂, H₂O, Nitrito (NO₂⁻) y nitrato (NO₃⁻). En general, la oxidación con síntesis y la respiración endógena son los dos pasos principales de la degradación aeróbica (Winkler y Straka, 2019).

Debido a la mayor demanda de oxígeno y al requisito de tiempo de tratamiento, los procesos aeróbicos se instalan principalmente después de los procesos anaeróbicos (Bustillo y Mehrvar, 2017). El proceso es factible de ser aplicado a aguas residuales con niveles bajos de DQO (<1000 mg/l) (Chan et al., 2009). El sistema es eficiente en la eliminación de patógenos y olores de las aguas residuales (Arvanitoyannis y Ladas, 2008). El exceso de producción de biomasa, el mantenimiento diario y el aumento de la demanda de oxígeno son los principales inconvenientes. Además, los lodos biológicos deben ser tratados antes de su eliminación final. No obstante, se puede conseguir una excelente eliminación de materia orgánica y nutrientes como N y P mediante este método (Bustillo y Mehrvar, 2015).

Entre los principales tratamientos aeróbicos para aguas residuales provenientes de centros de faenamiento se encuentran: Lagunas aeróbicas, Humedales construidos, Filtros percoladores, Proceso de lodos activados, Contactor biológico rotativo, Reactor de biopelícula de lecho móvil, y Reactor discontinuo de secuenciación intermitente (Aziz et al., 2019).

2.3. MEDICIONES DE CAUDALES PARA MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES

Por su parte Masse *et al.* (2003) en un estudio desarrollado en Quebec midieron los caudales de aguas residuales a través de dispositivos automáticos de lectura de consumos de agua instalados en los centros de faenamiento. Estos autores, luego tomaron muestras del residual y la filtraron a través de un tamiz metálico de 75 μm para eliminar parte de las SS y se almacenó a 2 °C. Sin embargo, en caso que no se cuente con dispositivos automáticos para la medición de caudal, se recomienda hacer uso de la ecuación 2.1, al igual que Gutiérrez (2012) para medir caudales a través de canales de descarga.

$$Q = \frac{V}{t} \quad [2.1]$$

Donde:

Q = Caudal en (L/seg)

V = Volumen captado en un recipiente (L)

t = tiempo que tardó el recipiente en ser llenado (seg)

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se coloca el recipiente con un volumen conocido en la salida del canal de descarga hasta que se llene.
- Se mide el tiempo que tarda la descarga en llenar el recipiente.
- Con los datos obtenidos, aplicar la ecuación 2.1.

2.4. MUESTREO DE AGUAS RESIDUALES

La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169 (NTE INEN, 2013) establece directrices para el muestreo de aguas que consisten en:

- Para la determinación de parámetros físicos y químicos, se llena completamente el recipiente (preferiblemente frascos) y taparlos para evitar que se llenen de aire; lo cual puede afectar propiedades como el pH, color, etc.

- Los recipientes cuyas muestras se van a congelar como método de conservación, no se deben llenar completamente.
- La refrigeración o congelación de las muestras es efectiva si se la realiza inmediatamente luego de la recolección de la muestra. Se debe usar, cajas térmicas o refrigeradores de campo desde el lugar del muestreo.
- La temperatura de refrigeración debe oscilar entre 2°C y 5°C y el almacenamiento en un lugar obscuro. El almacenamiento no debe ser durante un largo tiempo, especialmente en el caso de las aguas residuales domésticas y de las aguas residuales industriales.
- El congelamiento a temperaturas de -20 °C permite un incremento en el período de almacenamiento, sin embargo, es necesario un control del proceso de congelación y descongelación a fin de retornar a la muestra a su estado de equilibrio inicial luego del descongelamiento. En este caso, se recomienda el uso de recipientes de plástico (policloruro de vinilo o polietileno).
- La materia en suspensión, sedimentos, algas y otros microorganismos deben ser removidos en el momento de tomar la muestra o inmediatamente después por filtración.
- Los recipientes que contienen las muestras deben ser protegidos y sellados.
- El empaque debe proteger los recipientes de la posible contaminación externa y de la rotura.
- Durante la transportación, las muestras deben guardarse en ambiente fresco y protegidas de la luz.

2.5. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Los parámetros importantes a evaluar en aguas residuales provenientes de centros de faenamiento son: carga orgánica (DBO₅ y DQO), pH, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (SD), como lo propone Ahmadian *et al.* (2012) quienes trataron aguas residuales de centros de

faenamiento en un sistema de lotes utilizando electrodos de hierro (Fe). Sin embargo, una degradación completa de la materia orgánica presente en las aguas residuales de centros de faenamiento no es suficiente usando solo tratamiento anaeróbico. Los efluentes que contienen material orgánico deben ser sometidos a post tratamiento utilizando sistemas aerobios. Por esta razón, los procesos anaeróbicos o aeróbicos no deben usarse como la única alternativa de tratamiento debido a las características de los efluentes finales que aún requieren tratamiento para cumplir con los límites y estándares de descargas (Chan *et al.*, 2009).

Por otra parte, Fard *et al.* (2019) señalan que las aguas residuales de los centros de faenamiento suelen estar cargadas también de materia flotante (grasa), sangre, estiércol y una variedad de compuestos orgánicos (que provienen de las proteínas). La contaminación de las aguas residuales se deriva de la estabulación, el sacrificio, la eliminación de la piel y el vello, el manejo de los residuos orgánicos, el lavado de la carcasa, el renderizado y la limpieza. La resistencia de las aguas residuales depende del control de la planta, del uso del agua, la recuperación de los productos y la separación de las fuentes de desechos.

Por otra parte, las aguas residuales de los centros de faenamiento también pueden ocasionar problemas en otros aspectos como, por ejemplo, la salud pública, el paisaje, la calidad de vida de especies acuáticas, entre otros (Quijije y Aleja, 2016). Por ello, es necesario que previo a su descarga éstas sean sometidas a tratamientos para que los parámetros de calidad se ajusten a criterios admisibles para los sistemas de alcantarillado público. En el cuadro 2.3 se detallan varios criterios de calidad y sus límites máximos permisibles para la descarga de efluentes a los sistemas de alcantarillado público establecidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A (TULSMA, 2015).

Cuadro 2.3. Tabla 8: Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Parámetros	Unidad	Límite Máximo Permisible (LMP) Tabla 8
pH	---	6–9
Conductividad eléctrica	μS/cm	NA
Sólidos disueltos totales	mg/L	NA
Sólidos sedimentables	mg/L	20

Sólidos suspendidos totales	mg/L	220
Sólidos totales	mg/L	1600
DBO ₅	mg/L	250
DQO	mg/L	500

Fuente: TULSMA (2015), adaptada por autores de la investigación.

2.6. FILTROS PERCOLADORES

2.6.1. ANTECEDENTES

Los filtros percoladores se han utilizado para proporcionar tratamiento biológico de aguas residuales durante más de 100 años. Es un reactor biológico de película fija no sumergido que utiliza medios de roca o plástico sobre los cuales las aguas residuales se distribuyen continuamente (Godoy–Olmos *et al.*, 2016). Se utilizaron comúnmente en Polonia en los años setenta y ochenta para tratar las aguas residuales municipales y de la industria alimentaria. Los filtros percoladores clásicos disponen de un sistema de riego generalmente operado con tanques Imhoff. Además, los filtros percoladores rotativos se aplicaron ampliamente en ciudades pequeñas e instalaciones tales como hoteles, centros turísticos, etc. La interrupción de su uso en Polonia resultó por la introducción de las demandas relativas a la eliminación intensiva de compuestos biológicos en 1991; lo que prácticamente causó la desaparición de esta tecnología en aras del lodo activado (Bornemann *et al.*, 2018).

En Rusia, por ejemplo, un uso limitado del filtro percolador es derivado de estándares muy altos para eliminar la sustancia orgánica para receptores de aguas residuales específicos (Gogina y Yantsen, 2015). A diferencia de Polonia, las plantas de tratamiento de aguas residuales de Gran Bretaña utilizan filtros percoladores con éxito donde se operan con humedales construidos de flujo vertical u horizontal (Obarska Pempkowiak *et al.*, 2010).

Los experimentos que involucran filtros percoladores para el tratamiento de lixiviados de vertederos confirman que un uso efectivo de la tecnología de humedales artificiales es posible no solo para el tratamiento de aguas residuales municipales (Passeggi *et al.*, 2012; Lemji y Eckstädt, 2013). Esta tecnología, al contrario del lodo activado, es mucho más simple y tiene un menor costo de explotación. Los filtros percoladores operativos no generan el desperdicio típico

del método de lodo activado; también se caracterizan por menores requisitos de potencia (EPA, 2004; Henrich y Marggraff, 2013).

2.6.2. FUNCIONAMIENTO

Un filtro percolador está formado por un recipiente (que no retiene agua) que contiene medios inertes que apoyan el crecimiento microbiológico para degradar el material orgánico de las aguas residuales. El crecimiento biológico tiene un período de desarrollo aproximadamente de 10 días y se puede estimular su crecimiento aplicando una mezcla de agua residual sintética que aporta nutrientes y agua residual a tratar que permite desarrollar microorganismos que se adapten al medio (Li *et al.*, 2016) durante 10 días. Esto se denomina un biorreactor de película fija o aeróbico que generalmente depende del flujo de aire natural para el suministro de oxígeno; a diferencia del tratamiento de lodo activado, que es un sistema de crecimiento suspendido que depende de la aireación mecánica (Oyarzun *et al.*, 2019).

Los filtros de percoladores originales utilizaron rocas como medio de soporte para la película fija de limo biológico. Los filtros percoladores industriales actuales utilizan empaques de plástico de ingeniería con altas relaciones de área de superficie / volumen con altos volúmenes de vacío, para evitar bloqueos y lograr altas tasas de carga (Yang *et al.*, 2018). Todos los filtros comprenden un recipiente, empaquetado con los medios inertes. Las aguas residuales se distribuyen sobre la parte superior de los medios y se filtran hacia abajo como una película delgada sobre la superficie del empaque, donde el oxígeno y los compuestos orgánicos solubles se difunden a través de la capa de limo y son utilizados por la biomasa para producir productos de desecho (CO₂, H₂S y nuevas bacterias o células), según lo mencionado por Torres *et al.* (2016).

Una capa de limo biológico crece en el medio y los microorganismos absorben y utilizan la materia orgánica disuelta para su crecimiento y reproducción a medida que las aguas residuales caen al azar a través de los huecos entre los medios. La compleja población de microorganismos es predominantemente aeróbica (Zhang *et al.*, 2015). De acuerdo a Liu *et al.* (2019) el grosor de la capa biológica inicia desde 0,1 mm y aumenta proporcionalmente en función de la carga hidráulica y orgánica; hasta que la capa externa absorbe toda la materia orgánica

y hace que la capa interna entre en un crecimiento endógeno. Finalmente, el crecimiento desciende cuando el protoplasma de las células microbianas proporciona los alimentos en lugar de fuentes externas y pierden su capacidad de aferrarse a los medios, desprendiéndose. El material "desprendido" se lleva a cabo con el efluente como sólidos suspendidos.

Los filtros percoladores se utilizan para eliminar la materia orgánica de las aguas residuales. Es un sistema de tratamiento aeróbico que utiliza microorganismos unidos a un medio para eliminar la materia orgánica de las aguas residuales. Este tipo de sistema es común a una serie de tecnologías, como los contactores biológicos rotativos y los reactores de lecho empacado (torres biológicas). Estos sistemas son conocidos como procesos de crecimiento adjunto. En contraste, los sistemas en los cuales los microorganismos se mantienen en un líquido se conocen como procesos de crecimiento suspendido (Jaramillo *et al.*, 2019).

En este tipo de filtros, los microorganismos utilizados para tratar las aguas residuales se unen, o se fijan, a un medio sólido a medida que entran en contacto con las aguas residuales. Estos microorganismos forman un crecimiento en el medio conocido como película zoogélica. También se conocen como filtros biológicos para enfatizar que el proceso de filtración no es el esfuerzo mecánico de sólidos, sino la eliminación de sustancias orgánicas mediante el uso de acción bacteriana (Lesikar y Persyn, 1999).

De acuerdo a una revisión desarrollada por Stefanakis *et al.* (2015), las aguas residuales aplicadas a un filtro percolador deben someterse a un tratamiento primario antes de ser filtradas por esta tecnología, de lo contrario los sólidos bloquearán el filtro. Deben pasar a través de una pantalla de barra mecánica y/o clarificadores primarios donde se eliminan la mayoría de los sólidos sedimentables y flotantes. El efluente del filtro percolador siempre pasa a través de un clarificador secundario o filtro de arena para permitir la captura de sólidos generados como resultado del tratamiento del agua residual. El lodo (sólidos) de un clarificador final debe ser bombeado nuevamente al clarificador primario o a un espesor de lodo para un tratamiento posterior. En los filtros percoladores no se produce filtración física; los contaminantes se eliminan mediante procesos biológicos en un entorno aeróbico (Eding *et al.*, 2006).

A medida que las aguas residuales gotean sobre las superficies de los medios sólidos, las sustancias orgánicas quedan atrapadas en la capa bacteriana (Dermou *et al.*, 2005). Las bacterias absorben las sustancias orgánicas de la misma manera que en el proceso del lodo activado, mientras que el aire se difunde a la capa de lodo desde los espacios de aire en el lecho del filtro. De acuerdo a Kornaros y Lyberatos (2006) el crecimiento y la reproducción de las bacterias tienen lugar y dan como resultado un aumento del espesor de la capa del material filtrante, particularmente en la parte superior del filtro biológico. Periódicamente, los microorganismos se desprenden de las superficies de los medios filtrantes y se va con el agua residual tratada.

El requerimiento de energía para operar un filtro percolador es mínimo en comparación con otros métodos, debido a que el suministro de oxígeno a la bacteria es proporcionado por la difusión natural del aire. Sin embargo, el requerimiento de área de un filtro percolador es mayor que el de otros procesos para lograr la misma calidad de agua residual tratada (Lekang y Kleppe, 2000). Finalmente, de acuerdo a CONAGUA (2016) el diseño de los filtros percoladores está en función del tipo de carga orgánica volumétrica del filtro percolador, se considera de alta carga (0,32–10 kg/L. d).

Para estimar la carga orgánica volumétrica se aplica la ecuación 2.2 empleada por Reina (2015) en el desarrollo de tecnología sobre evaluación de la eficiencia y cinética de remoción de materia orgánica. Si se obtiene un valor superior a 0,32 kg/L. d es necesario realizar ajustes al sistema, debido a que el filtro percolador debe ser diseñado para flujo lento que es proporcional a una carga baja.

$$L_v = \frac{DQO * Q}{V} \quad [2.2]$$

$$L_v = \text{Carga orgánica volumétrica} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{L. día}} \right)$$

$$DQO = \text{Concentración de carga orgánica del afluente} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)$$

$$Q = \text{Caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$V = \text{Volumen} (\text{m}^3)$$

2.6.3. APLICABILIDAD

Los filtros percoladores permiten que el material orgánico en las aguas residuales sea adsorbido por una población de microorganismos (aerobios, anaerobios y bacterias facultativas; hongos; algas y protozoos) adheridos al medio como una película biológica o capa de limo (aproximadamente de 0,1 a 2 mm de espesor). A medida que las aguas residuales fluyen sobre el medio, los microorganismos que ya están en el agua se adhieren gradualmente a la superficie de la roca, escoria o plástico y forman una película (Muñoz, 2018). El material orgánico se degrada luego por los microorganismos aeróbicos en la parte exterior de la capa de limo.

A medida que la capa se espesa a través del crecimiento microbiano, el oxígeno no puede penetrar la cara del medio y se desarrollan organismos anaeróbicos. A medida que la película biológica continúa creciendo, los microorganismos cerca de la superficie pierden su capacidad de adherirse al medio y una parte de la capa de limo se cae del filtro, este proceso se conoce como desprendimiento. Los sólidos desprendidos son recogidos por el sistema de desagüe y transportados a un clarificador para su eliminación de las aguas residuales (Quispe y Garcia, 2016).

2.6.4. VENTAJAS DE UN FILTRO PERCOLADOR

El tratamiento biológico a través de filtros de percoladores es un método rentable para el tratamiento de aguas residuales. En este proceso, las aguas residuales pasarán por los medios adecuados. Cuando tiene contacto con la biopelícula generada en la superficie de los medios filtrantes, se realiza la degradación de las materias orgánicas por acción de los microorganismos al oxidar y reducir los contaminantes orgánicos e inorgánicos (Saucedo *et al.*, 2014).

Por su parte, Chan *et al.* (2015) considera que las principales ventajas del uso de biofiltración son la facilidad de operación y mantenimiento, la flexibilidad contra la variación de carga, el bajo costo de construcción, el diseño simple, el ahorro de energía, es económico y solo requiere un área pequeña para la instalación.

2.6.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN

De acuerdo a Harrison y Daigger (1987) los filtros percoladores se operaron bajo tres fases de prueba diferentes. Las fases de carga media y alta carga orgánica se llevaron a cabo durante el verano y el otoño cuando las aguas residuales contenían una combinación de residuos de procesos tanto domésticos como industriales. Estas fases simulaban una aplicación de filtro de desbaste de alta velocidad. La fase de baja carga se realizó durante los meses de invierno, cuando la intensidad de las aguas residuales se reduce debido a la infiltración del agua de lluvia y el cierre estacional de los procesadores de alimentos.

Los datos de nitrógeno y fosfato recopilados tanto en el efluente primario como en los efluentes del filtro de engaño indicaron que los nutrientes no limitaban la actividad biológica. Las plantas piloto fueron operadas durante 9 meses consecutivos. Las duraciones reales de las pruebas para este caso son entre 30 a 37 días, con períodos de aclimatación apropiados entre las fases. Durante cada fase, se aplica un flujo de reciclado y un factor esencialmente igual a cada filtro piloto, lo que resultó en cargas orgánicas solubles y totales esencialmente iguales por unidad de volumen (Muñoz y Reyes, 2013).

2.6.6. MEDIOS FILTRANTES DE LOS FILTROS PERCOLADORES

Los filtros desarrollan el crecimiento de microorganismos que están unidos a un medio de alta superficie para eliminar principalmente la materia orgánica soluble: demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual. Los filtros percoladores utilizan procesos aeróbicos para el tratamiento (Chernicharo, 2006). Los filtros de goteo y los filtros anaeróbicos también se conocen como reactores de biopelículas y crecimiento adjunto. A continuación, se detallan diferentes tipos de material filtrante para filtros percoladores exitosos en procesos de tratamiento de aguas residuales:

2.6.6.1. BASTONCILLOS DE ALGODÓN

Un estudio desarrollado por Aslam *et al.*, (2017) demostró que este material es un medio filtrante sostenible sin degradación notable. No se observó cambios estacionales significativos en la eficiencia del sistema de filtro percolador debido a la larga vida útil de los bastoncillos de algodón. Durante el estudio observó que

la eliminación de sólidos totales (ST) en aguas residuales está relacionada con la reducción de DQO. A medida que se redujo el ST, la concentración de DQO también disminuyó en el efluente. Los resultados fueron una de concentración inicial de 69–107 mg/l, se redujo a 39–60 mg/l.

2.6.6.2. ROCA

Es el medio original utilizado en los filtros percoladores, generalmente se usa piedra de campo, escoria o piedra triturada. Típicamente, las rocas tienen aproximadamente 2 a 4 pulgadas de diámetro. El tamaño real no es demasiado crítico; sin embargo, es importante que los medios sean uniformes para permitir una ventilación suficiente a través del espacio vacío. La mayor desventaja de las rocas o escorias es que la piedra ocupará la mayor parte del volumen del lecho filtrante: esto reduce los espacios vacíos necesarios para el paso del aire, lo que limita el área de superficie por unidad de volumen para el crecimiento biológico. Normalmente hay solo un 35% de espacio vacío entre los medios de roca (Shahriari y Shokouhi, 2015).

Las rocas no pueden sobrepasar profundidades de 1 a 2,5 m, los lechos de materiales sintéticos pueden soportar profundidades entre 6 y 12 m. El mayor porcentaje de huecos en los rellenos sintéticos facilita el flujo y reduce el peligro de inundación (Reyes y Reyes, 2009).

En los medios filtrantes rocosos, el sistema de drenaje inferior suele consistir en bloques de arcilla vitrificada o parrillas de fibra de vidrio que descansan sobre un falso fondo sobre la solera del filtro. La solera y el sistema de drenaje inferior deben ser suficientemente resistentes para soportar el peso del medio, de la biopelícula, y del agua residual. Por su parte, Gómez (2018) recomienda que, los medios filtrantes rocosos o litológicos deben tener un tamaño entre 5–10mm en el uso de filtros para reducir niveles en parámetros como turbidez del agua. Las rocas al poseer un tamaño mayor (2 a 4 pulgadas) deben ser sometidas a un tratamiento de trituración para que alcancen el tamaño óptimo recomendado de 5–10mm.

2.6.6.3. PLÁSTICO

La tecnología de filtro percolador también hace uso de plástico como medio filtrante para tratar las aguas residuales (Naz *et al.*, 2015); sin embargo, Morton y Auvermann (2001) hicieron uso de este material para tratar aguas resultantes de lagunas porcinas a través de la instalación de 9 filtros sin encontrar diferencia detectable ($p > 0,05$) entre los tratamientos. A pesar de estos resultados, en la actualidad se continúan rediseñados sistemas de filtros percoladores para un mayor rendimiento en la eficiencia.

2.6.6.4. PIEDRA PÓMEZ

La piedra pómez es una roca ígnea de color claro y extremadamente porosa que se forma durante las explosivas erupciones volcánicas. Se utiliza como agregado en concreto liviano, como agregado de paisajismo y como abrasivo en una variedad de productos industriales y de consumo. Es un material altamente poroso como para flotar en el agua, pero con un alto porcentaje de absorción de agua, lo que le permite hundirse cuando sus poros se hayan saturado (Galdames y Díaz 2015). Autores como Vásconez (2018) recomiendan que el tamaño de la piedra pómez como material filtrante debe oscilar entre 0,5–1,25cm. Por esta razón, debe ser sometida a un proceso de trituración, ya que en su estado natural la piedra pómez es de un tamaño mayor que puede alcanzar hasta 30cm, aproximadamente.

2.6.7. VIABILIDAD EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CENTROS DE FAENAMIENTO

Además de las lagunas de estabilización y los sistemas de aireación extendidos, los filtros percoladores han sido los procesos aeróbicos más populares para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de centros de faenamiento (Bull *et al.* 1982; Masse y Masse, 2000; Aziz *et al.*, 2019). Se informan altas remociones de DBO_5 , pero las concentraciones de SS del efluente a menudo son elevadas debido a la pobre capacidad de sedimentación (Johns, 1995).

La biomasa bacteriana presente en los medios degrada el contenido orgánico en presencia de oxígeno. Sin embargo, debido al aumento del grosor de la capa delgada, la transferencia de oxígeno es insuficiente y, por lo tanto, puede

observarse desprendimiento de biomasa bacteriana desde la superficie del medio. A pesar de las numerosas ventajas, su aplicación como unidad de tratamiento secundario en el tratamiento de efluentes de mataderos es limitada, especialmente en países como Estados Unidos, Australia e India (Irshad *et al.*, 2016).

Por su parte, Phillips (1975) informó alcanzar el 95% de eliminación de DBO_5 en un sistema de filtro percolador de alta velocidad, seguido de dos biofiltros secuenciales que, además, también constó de un tratamiento primario (floculación y sedimentación). La obstrucción de los medios filtrantes se produce debido a la alta concentración de compuestos proteicos, lo que da como resultado una disminución del rendimiento (Azad, 1976). Sin embargo, con el pretratamiento adecuado y el uso de medios filtrantes, se puede observar una reducción considerable en la materia orgánica.

Según Moodie y Greenfield (1978), aproximadamente el 50% de la DQO suspendida descargada de la instalación de un centro de faenamiento en Brisbane se trató empleando un tratamiento preliminar. Li *et al.* (1984) instalaron una planta piloto compuesta por unidades de tratamiento primario (flotación por aire disuelto) y secundario (filtros percoladores de dos etapas). Cada filtro de goteo tenía 2,4 m de altura y consistía en medios (superficie $98\text{m}^2/\text{m}^3$). Alrededor del 40–50% de eliminación de aceite y grasa se logró del sistema primario. En el caso de los filtros percoladores, las eficiencias de eliminación de materia orgánica fueron del 70 al 85%. Aparte de eso, la nitrificación también resultó, pero el proceso dependía completamente de las tasas de carga.

Los estudios intensivos de Musa *et al.* (2018) han demostrado que las tasas de carga orgánica juegan un papel vital en el tratamiento biológico. Los estudios intensivos realizados por ellos han demostrado que las eficiencias de eliminación de materia orgánica fueron del 60 al 85% cuando se operaron a tasas de carga orgánica de 1,2 a 8,1 $\text{kg DBO}/\text{m}^3\text{-d}$ para nueve filtros percoladores.

En la figura 2.1 se representa un esquema de un sistema de filtro percolador desarrollado por Lemji y Eckstädt (2013) para el tratamiento de aguas residuales que consistió en: 1): reservorio de aguas residuales; 2): bomba de alimentación; 3): filtro percolador; 4): puertos de muestreo; 5): bomba de drenaje; 6): clarificador

secundario; 7): agua clarificada; 8): bomba de recirculación; 9): recirculación. Estos autores demostraron que la siembra de microorganismos (desarrollo de biopelícula) se puede lograr simplemente bombeando las aguas residuales repetidamente hacia el filtro; lo que significa que no hay necesidad de usar una inoculación especial para el cultivo de los microorganismos. No obstante, en la fase de crecimiento de la biopelícula, sí es necesaria una breve fase de aclimatación antes de estar listo para funcionar por completo.

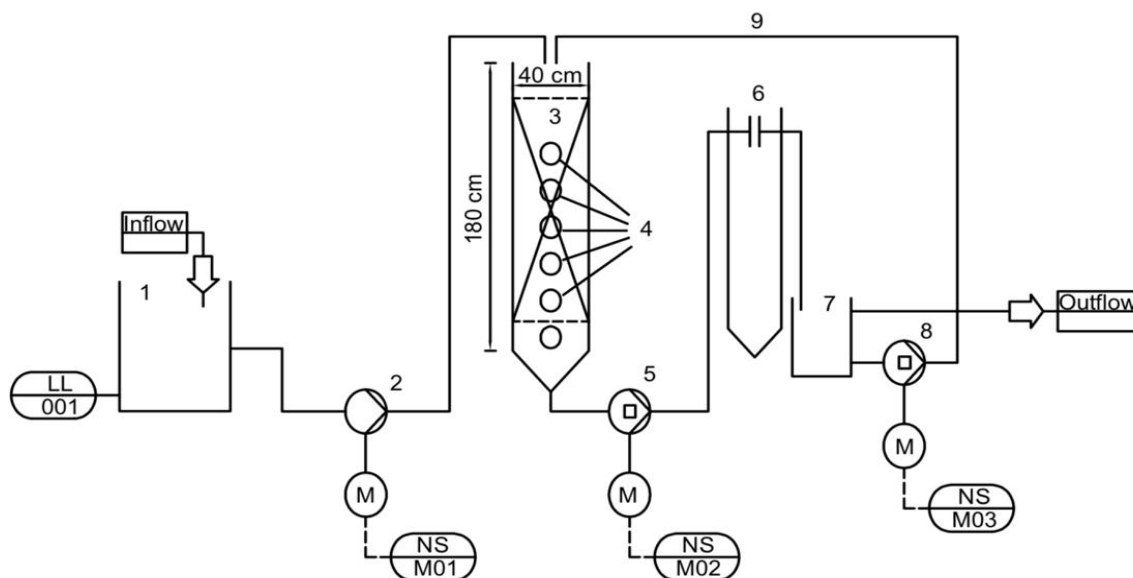


Figura 2.1. Esquema de flujo de la configuración experimental: filtro de goteo de escala piloto.

Fuente: Lemji y Eckstädt (2013)

Los hallazgos de esta investigación encontraron un valor promedio de $84,42 \pm 6,5\%$ de eficiencia de eliminación de DQO. El filtro de goteo puede tener suficiente circulación de aire de forma natural y la única demanda de energía es para bombear el agua alimentada. A través de este sistema, el manejo de lodos no es un problema porque la cantidad producida es pequeña y su naturaleza densa lo hace fácilmente sedimentable dentro del clarificador secundario.

La aclimatación de los microorganismos también se la puede hacer a través de la mezcla del agua residual a tratar con agua sintética (mezcla de compuestos que sirven de alimentos y nutrientes para el desarrollo de los microorganismos). En el cuadro 2.4 se presenta la proporción de diferentes materias primas establecidas por Cedeño (2016) para la generación de agua sintética. Un

volumen de 200 L de esta combinación permite reducir los niveles de DBO₅ hasta 700 mg/L.

Cuadro 2.4. Materias primas para preparación de agua sintética.

Materia Prima	Cantidad	Unidad
Agua	200	L
Sacarosa	438	g
Fosfato de Amonio	19	g
Sulfato de Amonio	8	g
Lisina	9	g

Fuente: Cedeño (2016)

2.6.8. PARÁMETROS DE DISEÑO DE FILTRO PERCOLADOR LENTO CON MEDIO FILTRANTE ROCOSO

Para el diseño de filtros percoladores, generalmente se utilizan los criterios establecidos por la EPA (2000). Es importante considerar que estos criterios son aplicados para tratar volúmenes significativos de agua residuales, a escala industrial (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5. Criterios para parámetros de diseño de filtro percolador lento con medio filtrante rocoso.

Parámetros	Criterios
Diámetro	6 – 65 m
Profundidad	1,5 – 2,5 m
Velocidad de la boquilla del brazo distribuidor	<1,2 m/s
Altura del brazo distribuidor sobre los medios	0,15 – 0,3 m
Ventilación / flujo de aire Natural	Natural: 0,03 m ³ /m ² *min Calado forzado: 0.3 m ³ /m ² *min
Tasa de carga orgánica	0,08 – 0,1 kg DBO/m ³ *d
Carga hidráulica	1–4 m ² /m ² *d
Eliminación de DBO	80–90%
Clarificación	40 m ³ /m ² *d

Fuente: EPA (2000)

Los medios filtrantes rocosos no pueden sobrepasar profundidades de 1 a 2,5 m, los lechos de materiales sintéticos pueden soportar profundidades entre 6 y 12 m. El mayor porcentaje de huecos en los rellenos sintéticos facilita el flujo y reduce el peligro de inundación (Reyes, 2009). Los criterios para parámetros de rellenos comunes se detallan en el cuadro 2.6.

Cuadro 2.6. Parámetros de rellenos comunes de filtros percoladores.

Parámetros	Criterios
Diámetro Área superficial específica	4–5 cm 80–110 m ² /m ³ de volumen total
% de huecos	45–55%
Carga hidráulica máxima	3,4–10 m ³ /s·m ² .

Carga orgánica volumétrica	0,32–10 kg/L.d
----------------------------	----------------

Fuente: CONAGUA (2016)

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

Esta investigación se realizó en el centro de faenamiento de la ciudad de Calceta cantón Bolívar de la provincia de Manabí, ubicación correspondiente a las coordenadas geográficas 0°50'28.95"S; 80°10'26.10"O.



Figura 3.1. Ubicación del centro de faenamiento de la ciudad de Calceta.

3.2. DURACIÓN

La presente investigación tuvo una duración de 9 meses, a partir de la aprobación del proyecto de titulación.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. CUANTITATIVO

Se eligió este método debido a que se manipuló la variable independiente, se evaluó el efecto de la carga hidráulica superficial (Variable independiente) en la reducción de la carga orgánica en el residual líquido del centro de faenamiento de Calceta (variable dependiente).

3.3.2. LABORATORIO

Consistió en el desarrollo de análisis de laboratorio a parámetros físico-químicos (p. eje. pH, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, DQO y DBO₅) en las muestras de agua residual proveniente del centro de faenamiento de Calceta pre y post tratamiento. Esto permitió determinar si el tratamiento era o no eficiente.

3.3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se realizaron a través de la estadística descriptiva, mediante gráficos de serie de tiempo y columna que representan la proyección de las variables.

3.4. VARIABLES A MEDIR

3.4.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Filtrado del efluente residual del centro de faenamiento de Calceta.

3.4.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Carga orgánica del efluente residual del centro de faenamiento de Calceta.

3.4.3. INDICADORES

- Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- Demanda Química de Oxígeno.

3.4.4. VARIABLES COMPLEMENTARIAS

- Sólidos disueltos (SD).
- Sólidos suspendidos (SS).
- Sólidos sedimentables (SSe).
- Sólidos totales (ST).
- pH.

3.5. PROCEDIMIENTO

La investigación se dividió en 3 fases, cada fase corresponde a cada objetivo.

3.5.1. FASE I. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE RESIDUAL PROCEDENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA

Actividad 1. Medición del caudal efluente del centro de faenamiento de Calceta

La medición del caudal de aguas residuales del centro de faenamiento se lo realizó durante dos semanas continuas (anexo 6a). De lunes a jueves en horario de 17h00–21h00 (4 horas) y de viernes a domingo, la medición se realizó de 17h00–24h00 (7 horas). La selección de los tiempos de medición se enmarcó al desarrollo de actividades en el centro de faenamiento; por ejemplo: faenamiento, limpieza, entre otras, asociadas directamente con la generación de residuos líquidos. Como punto de medición se consideró la tubería de descarga del efluente residual. Para esto, se colocó un recipiente de volumen conocido y se determinaron los tiempos de llenado; con el volumen conocido y el tiempo de llenado se determinó el caudal por método volumétrico propuesto por Gutiérrez (2012) que se detalla en la ecuación 2.1 (p 10).

Actividad 2. Muestreo y análisis en el laboratorio del residual líquido del centro de faenamiento de Calceta

Se siguió los procedimientos establecidos en la NTE INEN 2169 (NTE INEN, 2013). Se recolectaron muestras de agua residual en frascos de vidrio de 500 ml en un intervalo de 1 hora por cada día (4 horas diarias de lunes a jueves y 7 horas diarias de viernes a domingo); es decir de lunes a jueves se recolectó 4 submuestras por día y de viernes a domingo un total de 7 submuestras por día (anexo 6b). En total se recolectaron 37 submuestras de 500 ml por cada semana (74 submuestras durante las dos semanas). Finalmente, por semana se obtuvo una muestra compuesta de 18,5 L que incluyó la mezcla de las 37 submuestras. De la muestra compuesta del centro de faenamiento de Calceta se tomó un volumen aproximadamente de 500 ml como lo propone Trujillo (2018) y fue enviada al laboratorio Chávez Solutions Ambientales Cia Ltda. en la ciudad de Quito, siguiendo el protocolo de transporte NTE INEN 2169. En el laboratorio se

analizaron los parámetros físico-químicos (cuadro 3.1) recomendados por Ahmadian *et al.* (2012) para conocer las condiciones iniciales del estado del agua residual del centro de faenamiento.

Cuadro 3.1. Parámetros físico químicos analizados del agua residual.

Parámetros	Límite Máximo Permisible (LMP) Tabla 8 (TULSMA)	Unidad
pH	6–9	---
Conductividad eléctrica	N/A	µs/cm
Sólidos disueltos	N/A	mg/L
Sólidos sedimentables	20	mg/L
Sólidos suspendidos	220	mg/L
Sólidos totales	1600	mg/L
DBO ₅	250	mg/L
DQO	500	mg/L

Fuente: TULSMA (2015), adaptada por autores de la investigación.

3.5.2. FASE 2. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA, A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO CON SISTEMA DEL FILTRO PERCOLADOR

Actividad 3. Acondicionar el material filtrante

El material filtrante en el filtro percolador fue la piedra pómez que se sometió a un proceso de trituración a través de un martillo para alcanzar el tamaño óptimo (0,5–1,25 mm), siguiendo las recomendaciones de Vásquez (2018). El material filtrante triturado fue pasado a través de un tamiz como lo recomienda Masse *et al.* (2003) para obtener un tamaño de partícula homogéneo (anexo 7a). El material filtrante (tamaño 0,5–1,25 mm) se ubicó uniformemente, sin dejar espacios vacíos prolongados. Posteriormente, fue lavado con agua potable y se verificó la inundación a todo el sistema. El propósito del lavado fue para eliminar las arenas o materiales ajenos al material filtrante (Lemji y Eckstädt, 2013).

Actividad 4. Preparación y funcionamiento del sistema de filtro percolador

Para este estudio, se siguió el diseño aplicado por Lemji y Eckstädt (2013) quienes establecieron un diagrama esquemático de un filtro percolador a escala piloto (ver figura 2.1). Se eligió este modelo porque es un método prometedor de

tratamiento de aguas residuales con respecto a la eliminación de DQO que es uno de los parámetros más importantes a tratar. El sistema constó de un reservorio de agua residual (anexo 7b), un filtro percolador (anexo 7c) con un distribuidor de flujo fijo (anexo 7d), un clarificador secundario y un recipiente para la recirculación (anexo 7e) a través de una bomba.

Se determinó el caudal de paso de agua residual mediante el filtro percolador con una estimación básica que incluyó la relación entre el total de litros a tratar durante un día (200L/1440min); obteniendo como resultado un caudal de salida de 0,14 L/min (filtro lento). Además, se realizaron pruebas mediante la apertura de las llaves controlando el volumen de paso requerido (0,14 L) por cada minuto de tiempo (anexo 7f).

Para formación de la capa bacteriana que fue responsable del tratamiento biológico se hizo una mezcla entre agua sintética y agua residual del centro de faenamiento (anexo 8a), en una relación de 10:1. Esta solución fue irrigada al material filtrante (anexo 8b), como lo propone Li *et al.* (2016) durante 10 días hasta conseguir una capa bacteriana (anexo 8c) de al menos 1mm de espesor. El agua residual sintética se la hizo de acuerdo a la metodología establecida Cedeño (2016).

El primer día, se inoculó en el agua residual sintética, como indica Simsek *et al.*, (2013) a razón de 1:10 (León *et al.*, 2006), con el objetivo de optimizar el crecimiento de los microorganismos. Se dejó en reposo el agua residual sintética con agua residual a tratar en el filtro percolador durante 24 horas, para que los microorganismos se puedan adherir al material filtrante y su aclimatización (Lemji y Eckstädt, 2013) con la finalidad de aumentar la velocidad de formación. El sistema estuvo listo cuando se apreció un grosor de la capa bacteriana, a partir de 0,1 mm (Li *et al.*, 2016; CONAGUA, 2016; Muñoz, 2018; Liu *et al.*, 2019).

Una vez cumplida cada una de las especificaciones descritas previamente, el sistema estuvo listo para su funcionamiento. Como requisito se debió incluir la agitación y filtración mediante textiles del agua residual (anexo 8d) para que ésta pudiera alimentar fluidamente al filtro y evitar obstrucciones.

Finalmente, se aplicó la ecuación 2.2 como lo propone Reina (2015) para estimar la carga orgánica volumétrica del sistema; considerando los criterios de

CONAGUA (2016) que establece niveles menores a 0,32 kg/Ld para este parámetro. Si los niveles superan este valor, se debe realizar un ajuste al diseño ya que se establece que un filtro percolador lento es más óptimo y eficiente en su funcionamiento.

Actividad 5. Análisis en el laboratorio del agua residual filtrada

Se tomaron muestras del efluente tratado en el filtro y se sometió a análisis de laboratorio. Entre los parámetros analizados se encuentran los recomendados por Ahmadian *et al.* (2012) que son DQO y DBO₅, ST, SD, SS y pH que fueron evaluados en el laboratorio Chávez Solutions Ambientales Cia. Ltda en la ciudad de Quito, con acreditación N° OAE LE C 14–002. Estos parámetros descritos fueron analizados al inicio y final (día 21) del tratamiento, como lo recomiendan Harrison y Daigger (1987). La carga orgánica (DQO y DBO₅) y pH se midieron adicionalmente los días 6, 9, 12 y 18 en el laboratorio de Química ambiental de la ESPAM MFL, considerando las precauciones de Jensen *et al.* (2015) en el manejo de las muestras. Esto se realizó para tener un mayor número de datos.

Actividad 6. Comparación con Normativa de la Legislación Ambiental Ecuatoriana

Como el destino del efluente del Centro de faenamiento de Calceta es la laguna de oxidación, se comparó los resultados del residual líquido post tratamiento con los *límites de descarga de efluentes al sistema de alcantarillado público* del libro VI “Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua” del TULSMA (2015).

3.5.3. FASE 3. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA Y VIABILIDAD TÉCNICA– ECONÓMICA DEL FILTRO PERCOLADOR EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO

Actividad 7. Análisis de eficiencia

Para las variables Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Totales se realizó el análisis de eficiencia, de acuerdo a la

ecuación utilizada por Wu *et al.*, (2018) en su tratamiento con Filtros percoladores, la cual se representa de la siguiente manera:

$$E = \frac{C_a - C_e}{C_a} \times 100 \quad [3.1]$$

E = eficiencia del sistema en %

C_a = Concentración de entrada

C_e = Concentración de salida

Se comparó entre las medias de eficiencia de remoción de carga orgánica de cada muestra analizada, y se sometió a la aplicación de un análisis de varianza para conocer la significancia del sistema en la remoción de carga orgánica. Finalmente, los datos se los analizó mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics Base 22.0.

Actividad 8. Análisis Costo/Beneficio

Se realizó una estimación económica del costo asociado a los materiales y mano de obra requerida para el desarrollo del filtro percolador a escala piloto, cuya capacidad máxima sería 200L y un volumen a tratar de 3m³/día. Posteriormente, se determinó el valor económico del m³ en función de un tiempo útil de un año del filtro. De acuerdo al valor obtenido se conoce si el prototipo es viable o no económicamente.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. FASE 1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE RESIDUAL PROCEDENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA

En el gráfico 4.1 se presenta las fluctuaciones de los caudales medidos durante dos semanas en el centro de faenamiento de la ciudad de Calceta.

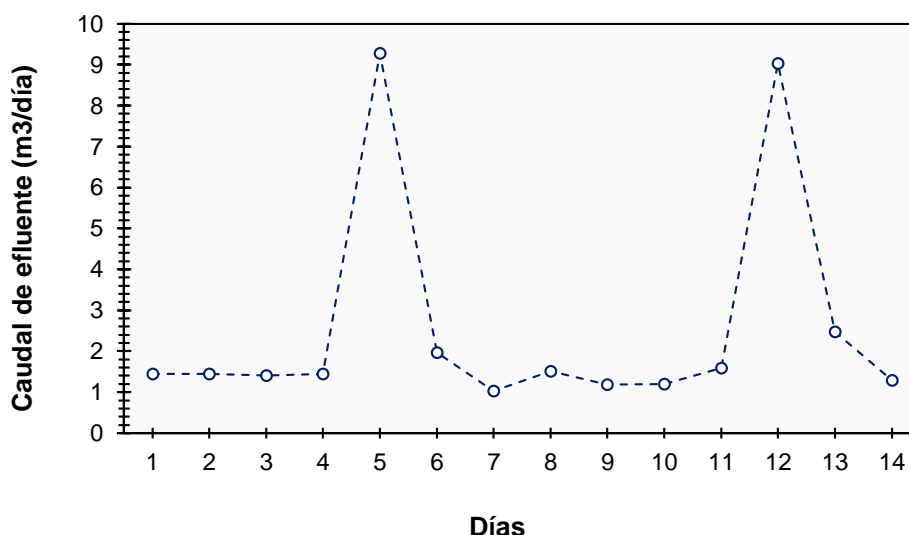


Gráfico 4.1. Medición del caudal efluente del centro de faenamiento de Calceta.

Como se aprecia en el gráfico 4.1, en los días 5 y 12 que corresponden a viernes, se registra un mayor nivel de caudal (valor promedio de $9,15 \text{ m}^3/\text{día}$); debido a que en este día de la semana se sacrifica y procesa un mayor número de animales. Esto se vincula a las necesidades del día siguiente (sábado) que es cuando se registra mayor actividad comercial en la ciudad de Calceta. Sábado es el día en el que existe mayor desplazamiento de ciudadanos locales y/o de pueblos cercanos para realizar el abastecimiento de productos entre los que se destaca la carne de res y cerdo proveniente del centro de faenamiento. Por otra parte, domingo es el día que se registra una menor producción de caudal (nivel promedio de $1,16 \text{ m}^3/\text{día}$) asociado a las aguas residuales del centro de faenamiento ($1,03 \text{ m}^3/\text{día}$ en la semana 1 y $1,29 \text{ m}^3/\text{día}$ en la semana 2). Las fluctuaciones del caudal se enmarcaron en un rango de $1,03\text{--}9,28 \text{ m}^3/\text{día}$ (ver anexo 1).

En el cuadro 4.1 se presentan los niveles de los parámetros físico-químicos analizados inicialmente al agua residual del centro de faenamiento de Calceta, comparándolos con la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A (TULSMA, 2015).

Cuadro 4.1. Parámetros físico químicos analizados.

Parámetros	Unidad	Resultado	Límite Máximo Permissible (LMP) Tabla 8	Nivel de cumplimiento con TULSMA
pH	---	7,06	6–9	C
Conductividad eléctrica	μS/cm	<84,00	NA	NA
Sólidos disueltos totales	mg/L	1391,00	NA	NA
Sólidos sedimentables	mg/L	7,80	20	C
Sólidos suspendidos totales	mg/L	2908,00	220	NC
Sólidos totales	mg/L	4307,00	1600	NC
DBO ₅	mg/L	1000,00	250	NC
DQO	mg/L	5000,00	500	NC

Se encontró que los parámetros: Sólidos suspendidos totales (2908 mg/l), Sólidos totales (4307 mg/l), DBO₅ (1000 mg/l) y DQO (5000 mg/l) no cumplen con los criterios de calidad establecidos por el TULSMA (anexo 2); lo que indica que supera los LMP comprendidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A. Estos resultados guardan correspondencia con los criterios de Bustillo *et al.* (2014) quienes establecen que las aguas residuales procedentes de centros de faenamiento se caracterizan por presentar concentraciones elevadas de cargas contaminantes como DQO y DBO₅ y sólidos relacionadas con los residuos orgánicos y subproductos de animales sacrificados y procesados.

A pesar de estos resultados, también se encontró que el pH y los sólidos sedimentables sí se enmarcan a un nivel de cumplimiento como lo establece el TULSMA a través de la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A. Los niveles de pH, según Bustillo y Mehrvar (2015) de las aguas residuales de centros de faenamiento se encuentran en rangos 4,90–8,10; lo que permite identificar que adicionalmente al cumplimiento con la normativa, valor encontrado en este estudio para pH (7,8) también se ajusta a la conclusión de dichos autores.

4.2. FASE 2. DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE RESIDUAL DEL CENTRO DE FAENAMIENTO DE CALCETA, A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO CON SISTEMA DEL FILTRO PERCOLADOR

En el cuadro 4.2 se detallan las especificaciones técnicas del sistema de filtro percolador por cada uno de sus componentes independientes.

Cuadro 4.2. Especificaciones consideradas en el diseño del sistema de filtro percolador.

Proceso	Volumen	Altura	Diámetro
Tanque de alimentación	200 L	1,20 m	0,89 m
Filtro percolador	100 L	0,80 m	0,60 m
Clarificador secundario	100 L	0,80 m	0,60 m
Recipiente de recirculación	50 L	0,60 m	0,60 m

El sistema incluyó a un reservorio de 200 L o tanque de alimentación, ubicado en un nivel superior para que el agua bajara por efecto de la gravedad. El filtro percolador a escala piloto consistió en un recipiente de 100 L de PVC (Ladino *et al.*, 2017), tuvo las siguientes dimensiones: altura 0,80 m, diámetro 0,60 m y 2,5 mm de espesor (CONAGUA, 2016). En la parte superior se instaló un distribuidor de flujo fijo para facilitar la salida del agua residual, uniformemente. El sistema de irrigación estuvo conectado al tanque de alimentación mediante una llave 1/2" y un distribuidor de flujo (Antonie, 2017). Adicionalmente, el sistema constó de un clarificador secundario que consistió en un tanque de PVC, cuya capacidad máxima era de 100 L y sirvió para recolectar y depositar el efluente del sistema de drenaje del filtro percolador. El agua del clarificador secundario pasó a un recipiente de 50 L, para la recirculación a través de una bomba.

En el cuadro 4.3 se muestra que en este sistema de filtro percolador se alcanza un nivel de 0,000504 kg/L. día en la carga orgánica volumétrica, lo que permite enmarcar a esta tecnología como un sistema lento, ya que de acuerdo a lo propuesto por CONAGUA (2016), los filtros de carga alta son aquellos que registran una carga orgánica volumétrica entre 0,32–10 kg/L.d.

Cuadro 4.3. Nivel de carga orgánica del filtro percolador.

Concentración de carga orgánica del afluente	Caudal	Volumen	Carga orgánica volumétrica filtro	Carga orgánica volumétrica (CONAGUA)
$\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)$	$\left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)$	(m^3)	$\left(\frac{\text{Kg}}{\text{L. día}}\right)$	$\left(\frac{\text{Kg}}{\text{L. día}}\right)$
5000	0,2	0,2	0,000504	0,32–10

En el cuadro 4.4 se detalla el proceso evolutivo del desarrollo de la biopelícula en el filtro percolador.

Cuadro 4.4. Formación de la biopelícula.

Día	Estado de la biopelícula	Grosor de la biopelícula (mm)
1	Ausencia	0 mm
2	Ausencia	0 mm
3	Visible	0,2 mm
4	Visible	0,3 mm
5	Visible	0,5 mm
6	Visible	0,9 mm
7	Visible	1,3 mm
8	Visible	1,8 mm
9	Visible	2,3 mm
10	Visible	2,7 mm

La biopelícula del filtro percolador tuvo un crecimiento rápido. A partir del día 3 se apreció el desarrollo progresivo de la capa bacteriana hasta el día 10 que ya había alcanzado un de grosor de 2,7 mm; indicando que los microorganismos se habían adaptado a las condiciones del agua residual y su reproducción era favorable. Esto se asocia a lo argumentado por Reyes y Reyes (2009) quienes encuentran que los materiales filtrantes con espacios vacíos son ideales para el desarrollo de microorganismos, adicionalmente a la función de evitar la inundación del sistema.

En el gráfico 4.2 se muestran las mediciones de pH durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.

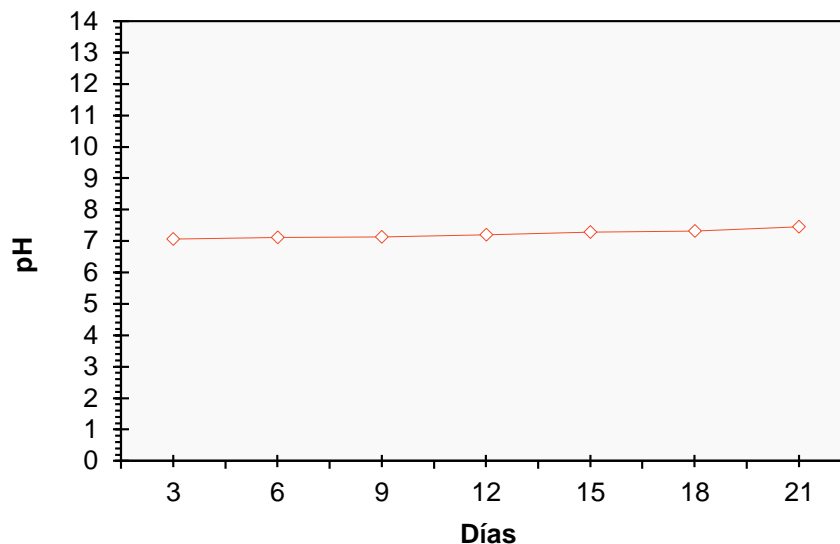


Gráfico 4.2. Mediciones de pH durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.

Las mediciones variaron en mínimos niveles, desde 7,06 hasta 7,46 (anexo 3). Esta ocurrencia de ascenso mínimo de pH se relaciona proporcionalmente con el aumento de días en el tiempo de contacto; ocurriendo cuando el agua procedente del centro faenamiento de Calceta pasa a través del filtro percolador. Se puede inferir que los niveles variaron producto de un mayor tiempo y debido a que el sistema al ser aerobio, siendo probable de que material circundante se mezclara. A pesar de esta ligera variación, el nivel de pH se encuentra dentro del nivel de intervalo establecido por Muñoz (2012) quien estudió la composición del agua residual procedente de centros de faenamiento, encontrando un nivel medio de pH totalmente neutro (7).

En el gráfico 4.3, se muestran las mediciones de la carga orgánica (DQO y DBO₅) durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días. La DQO y DBO₅ presentó un efecto opuesto al del pH, es decir que mientras mayor era el tiempo de contacto del agua residual con el filtro percolador, menor fueron los niveles estos dos parámetros.

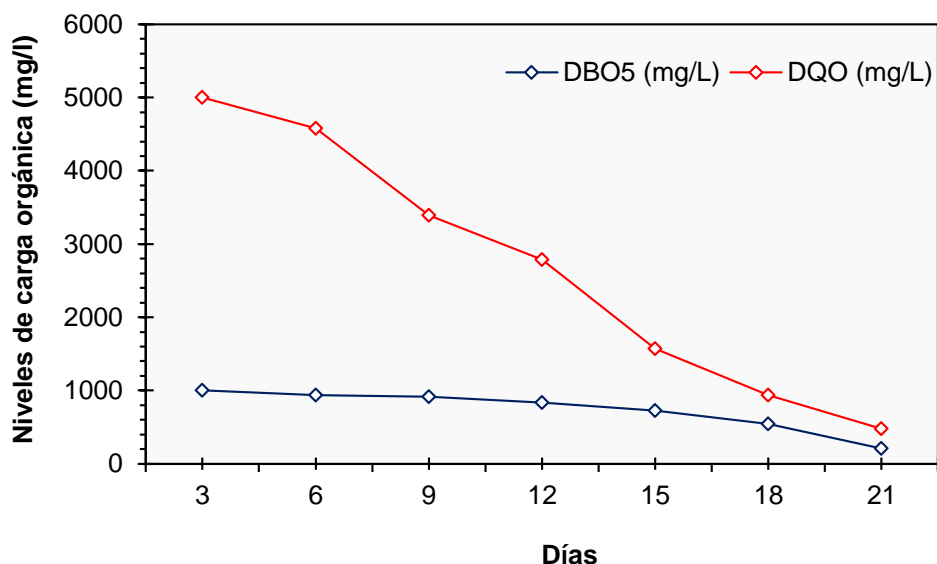


Gráfico 4.3. Mediciones de DBO₅ y DQO durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.

La tendencia de la DBO₅ y DQO fue descender proporcionalmente. En el caso de DBO₅, desde 1000 mg/L hasta 206 mg/L. La DQO se presentó en niveles desde 5000 mg/L hasta 480 mg/L. La DQO registró la diferencia más representativa en el día 9, mientras que en la DBO₅ el mayor cambio en la reducción del nivel se registró el día 21. A pesar que el descenso de los niveles de carga orgánica fue progresivo en el sistema aerobio implantado, se hace mención a los argumentos de Chan *et al.* (2009) quien no justifica a un solo tratamiento como única alternativa. Los descensos de carga orgánica indican el buen funcionamiento de los microorganismos desarrollados en el filtro, asumiendo que ésta se formó bien y se adaptó a las condiciones encontradas en este tipo de medio de agua contaminada; argumentando con los descrito por Zhang *et al.* (2015) quienes afirman que en los sistemas aerobios es diversa la población de microorganismos; lo que puede generar un mayor consumo y demanda de alimento, permitiendo la degradación de la carga orgánica.

En el cuadro 4.5 se muestran los resultados de los parámetros físico-químicos analizados una vez concluido los 21 días del tratamiento (contacto del agua residual con el filtro percolador), comparada con los límites de descarga de efluentes al sistema de alcantarillado público descritos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097-A (TULSMA, 2015).

Cuadro 4.5. Parámetros físico químicos analizados comparados con los LMP de descarga de efluentes al sistema de alcantarillado del TULSMA (2015).

Parámetros	Unidad	Resultado	Límite Máximo Permisible (LMP) Tabla 8	Nivel de cumplimiento con TULSMA
pH	---	7,46	6–9	C
Conductividad eléctrica	μS/cm	<84,00	NA	NA
Sólidos disueltos totales	mg/L	1100,90	NA	NA
Sólidos sedimentables	mg/L	1,10	20	C
Sólidos suspendidos totales	mg/L	212,00	220	C
Sólidos totales	mg/L	1314,00	1600	C
DBO ₅	mg/L	206,00	250	C
DQO	mg/L	480,00	500	C

En el post tratamiento se aprecian variaciones importantes en los niveles de todos los parámetros analizados; incluso se puede apreciar que éstos se ajustan a los LMP establecidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A (Anexo 4). El filtro percolador permitió que los parámetros del agua residual mejoren considerablemente; lo que indica un buen funcionamiento y eficiencia del mismo. Por ejemplo, la DBO₅ de 1000,00 mg/L desciende hasta 206 mg/L y la DQO de 5000 mg/L desciende hasta 489 mg/L. Solamente el parámetro de conductividad eléctrica se mantiene igual al pretratamiento (<84,00 μS/cm) y el pH muestra un ascenso hasta 7,46.

Estos hallazgos, permiten tener una confiabilidad en el sistema del filtro percolador para el tratamiento de aguas residuales de centros de faenamiento, tanto en carga orgánica como en sólidos, que de acuerdo a Fard *et al.* (2019) estos parámetros son los más representativos en este tipo de agua. En este mismo escenario, los resultados permitieron evidenciar una degradación alta de la carga orgánica que es el interés principal del estudio, y se asocia al uso de varios procesos dentro del sistema que en relación con Chan *et al.* (2009) es necesario varios procesos alternativos o secundarios para alcanzar un mejor nivel de degradación.

4.3. FASE 3. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA Y VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DEL FILTRO PERCOLADOR EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL EFLUENTE DEL CENTRO DE FAENAMIENTO

En el gráfico 4.4, se muestra la eficiencia de los distintos parámetros analizados (SDT, SS, SST, ST, DQO y DBO₅) durante los 21 días de contacto del agua residual con el sistema de filtro percolador.

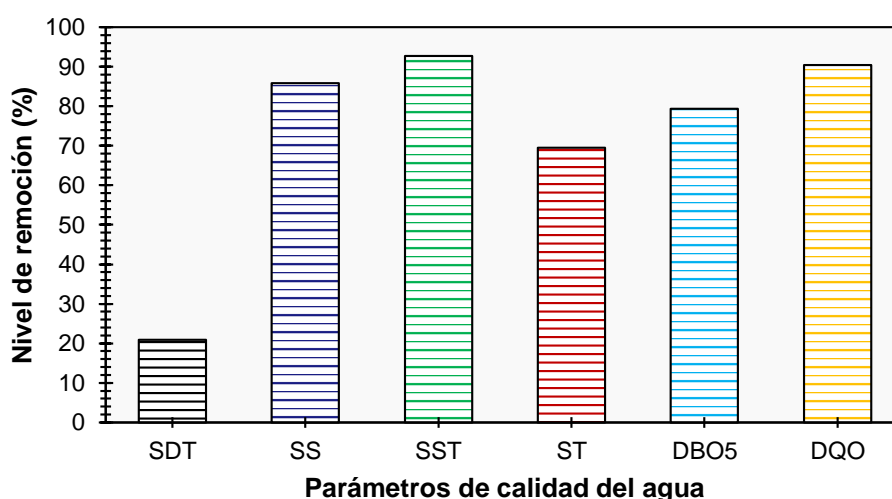


Gráfico 4.4. Eficiencia en la remoción de niveles de parámetros físico-químicos analizados

La mayor eficiencia (92,71%) se obtuvo para el parámetro SST y la menor eficiencia para el parámetro de SDT, con un valor de 20,86%. En el caso de carga orgánica también se obtuvo una eficiencia representativa, donde se destaca a la DQO con un 90,40%, a diferencia de la DBO₅ que registró una eficiencia de hasta 79,40% (Anexo 5).

La remoción de DBO₅ guarda considerable correspondencia con el estudio de Phillips (1975) quien pudo alcanzar una eficiencia de hasta 95% en la eliminación de DBO₅; a pesar de que su sistema fue de alta velocidad e integró dos biofiltros secuenciales y un tratamiento primario. Para el caso de la DQO, este estudio contrasta con los hallazgos de Lemji y Eckstädt (2013) quienes pudieron registrar una eficiencia de hasta el $84,42 \pm 6,5\%$ en la eliminación de DQO, a partir del mismo diseño de filtro percolador empleado en esta investigación.

En el cuadro 4.6 se presenta la estimación económica para tratar 1m^3 de agua residual en el centro de faenamiento de Calceta, según el modelo correspondiente. El prototipo de filtro percolador tuvo un costo total de \$191. La bomba es el elemento con mayor costo dentro de proyecto. Se requirió de 3 recipientes de diferentes dimensiones, dando un costo total de \$36,00. El costo de la mano de obra requerida para completar el trabajo fue de \$40,00.

Cuadro 4.6. Resumen de la estimación de costos para el filtro percolador a escala piloto.

Componente	Costo (\$)	Volumen a tratar en 1 año (m ³)
<i>Tanque 200 L</i>	20	
<i>Recipiente 100 L</i>	8	
<i>Recipiente 50 L</i>	8	
<i>Material filtrante</i>	20	$3\text{m}^3/\text{día} * 365 = 1095$
<i>Accesorios</i>	15	
<i>Bomba</i>	80	
<i>Mano de obra</i>	40	
Costo total	191	$\\$191/1095\text{ m}^3 = \\$0,174$

Se estima un tiempo de vida útil de un año para el prototipo de filtro percolador. El filtro percolador está diseñado para tratar un volumen mínimo $3\text{ m}^3/\text{día}$. Para un periodo de un año, el volumen total de agua a tratar es de 1095 m^3 . El costo total de tratar cada m^3 es de \$0.17. Esto demuestra la viabilidad del proyecto debido al bajo costo de tratar cada metro cúbico de agua residual y los beneficios potenciales que se obtienen.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En la caracterización del efluente residual procedente del centro de faenamiento de Calceta se midió un caudal promedio de 9,15 m³/día de agua residual con un pH de 7,06 y concentraciones de sólidos y carga orgánica superiores a los LMP establecidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A.
- El tratamiento a las aguas residuales del centro de faenamiento de Calceta, mediante el filtro percolador, permitió determinar una mejor calidad; enmarcándose a los criterios y LMP establecidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A.
- La eficiencia del sistema de filtro percolador fue alta; removiendo significativamente niveles de carga orgánica (90,40% para DQO y 79,40% para DBO₅). Además, económicamente los costos para tratar 1m³ de agua residual son bajos. Ante los hallazgos expuestos, se acepta la idea a defender del estudio; demostrando que el filtro percolador es viable técnica y económicamente para el tratamiento de aguas residuales procedentes del centro de faenamiento de Calceta.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar un monitoreo de los caudales de agua residual procedente del centro de faenamiento de Calceta en un tiempo mínimo de un mes para tener un mayor número de datos y tener una mayor aproximación de la realidad.
- Desarrollar el sistema de filtro percolador anaerobio para comparar los resultados de las eficiencias en la remoción de carga orgánica con este modelo que fue de carácter aerobio.
- Implementar el sistema de filtro percolador a escala real para garantizar que las descargas del agua residual procedente del centro de faenamiento no afecten la calidad de otros recursos como el suelo y la biodiversidad debido a que se ajusta a los LMP establecidos en la Tabla 8 del Acuerdo Ministerial 097–A.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmadian, M., Yousefi, N., Van Ginkel, S.W., Zare, M.R., Rahimi, S., Fatehizadeh, A., (2012). Kinetic study of slaughterhouse wastewater treatment by electrocoagulation using Fe electrodes. *Water Sci. Technol*, 66(4), 754–760.
- Al–Mutairi, N., Al–Sharifi, F., y Al–Shammari, S. (2008). Evaluation study of a slaughterhouse wastewater treatment plant including contact–assisted activated sludge and DAF. *Desalination*, 225(1–3), 167–175.
- Antonie, R. L. (2017). *Fixed biological surfaces–wastewater treatment: The rotating biological contactor*. CRC press.
- Arvanitoyannis, I. S., y Ladas, D. (2008). Meat waste treatment methods and potential uses. *International Journal of Food Science y Technology*, 43(3), 543–559.
- Arvanitoyannis, I., & Ladas, D. (2008). Meat waste treatment methods and potential uses. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(3), 543–559.
- Aslam, M. M. A., Khan, Z. M., Sultan, M., Niaz, Y., Mahmood, M. H., Shoaib, M., ... y Ahmad, M. (2017). Performance Evaluation of Trickling Filter–Based Wastewater Treatment System Utilizing Cotton Sticks as Filter Media. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(5).
- Azad, H. S. (1976). *Industrial wastewater management handbook*. McGraw–Hill.
- Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Khan, S., & Farooqi, I. (2019). Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of the total environment*, 686, 681–708.
- Barrera, M., Mehrvar, M., Gilbride, K., McCarthy, L., Laursen, A., Bostan, V., Pushchak, R. (2012). Photolytic treatment of organic constituents and bacterial pathogens in scondary effluent of synthetic slaughterhouse wastewater. *Chem. Eng. Res. Des*, 90(9), 1335–1350.
- Benavides. (2013). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la central de sacrificio de Tuquerres (Nariño).
- Bobenrieth; Beltrán y Arenas. (2015). Saneamiento de centro de faenamientos de bovinos, ovinos, y porcinos. *Revista Bol of Sanit Panam*. 98(3):211–227.
- Bornemann, G., Waßer, K., y Hauslage, J. (2018). The influence of nitrogen concentration and precipitation on fertilizer production from urine using a trickling filter. *Life sciences in space research*, 18, 12–20.

- Bull, M. A., Sterritt, R. M., y Lester, J. N. (1982). The treatment of wastewaters from the meat industry: a review. *Environmental Technology*, 3(1–11), 117–126.
- Bustillo, C., & Mehrvar, M. (2017). Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. *Journal of cleaner production*, 141, 278–289.
- Bustillo, C., Mehrvar, M., y Quiñones, E. (2014). Cost–effectiveness analysis of TOC removal from slaughterhouse wastewater using combined anaerobic–aerobic and UV/H₂O₂ processes. *Journal of environmental management*, 134, 145–152.
- Bustillo, C., Mehrvar, M., y Quiñones, E. (2016). Slaughterhouse wastewater characterization and treatment: an economic and public health necessity of the meat processing industry in Ontario, Canada. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4(04), 175.
- Bustillo, C., y Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of environmental management*, 161, 287–302.
- Cao, W., Mehrvar, M. (2011). Slaughterhouse wastewater treatment by combined anaerobic baffled reactor and UV/H₂O₂ processes. *Chem. Eng. Res. Des*, 89 (7).
- Cedeño, I. 2016. El tiempo de retención hidráulico de un lecho bacteriano aerobio relleno con caña guadua y la nitrificación en un residual sintético. Tesis Ingeniería Ambiental. Calceta, Ecuador.
- Chan, C., Neufeld, K., Cusworth, D., Gavrilovic, S., y Ngai, T. (2015). Investigation of the effect of grain size, flow rate and diffuser design on the CAWST biosand filter performance. *International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship*, 10(1), 1–23.
- Chan, Y., Chong, M., Law, C., & Hassell, D. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155(1-2), 1-18.
- Chernicharo, C. (2006). Post–treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5(1), 73–92.

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos de Oxidación Bioquímica con Biomasa Fija.
- Davarnejad, R., & Nasiri, S. (2017). Slaughterhouse wastewater treatment using an advanced oxidation process: optimization study. *Environmental Pollution*, 223, 1-10.
- Debik, E., y Coskun, T. (2009). Use of the Static Granular Bed Reactor (SGBR) with anaerobic sludge to treat poultry slaughterhouse wastewater and kinetic modeling. *Bioresource Technology*, 100(11), 2777–2782.
- Dermou, E., Velissariou, A., Xenos, D., y Vayenas, D. V. (2005). Biological chromium (VI) reduction using a trickling filter. *Journal of hazardous materials*, 126(1–3), 78–85.
- Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., y Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review. *Aquacultural engineering*, 34(3), 234–260.
- Environment Canada. (2012). Wastewater Systems Effluent Regulations. Fisheries Act. SOR/2012–139. consultado 06 enero de 2019. Disponible en: <http://laws-lois.justice.gc.ca>.
- EPA (Agencia de Protección Ambiental). (2000). Wastewater Technology Fact Sheet Trickling Filter Nitrification. US. (En línea). Consultado 29 noviembre de 2019. Formato PDF Disponible en: <https://www3.epa.gov>.
- EPA (Agencia de Protección Ambiental). (2004). Primer for Municipal Wastewater Treatment Systems. US. (En línea). Consultado 29 noviembre de 2019. Formato PDF Disponible en: <https://www3.epa.gov>.
- Eryuruk, K., Un, U., & Ogutveren, U. (2018). Electrochemical treatment of wastewaters from poultry slaughtering and processing by using iron electrodes. *Journal of cleaner production*, 172, 1089-1095.
- Fard, M., Mirbagheri, S., Pendashteh, A., y Alavi, J. (2019). Biological treatment of slaughterhouse wastewater: kinetic modeling and prediction of effluent. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 1–11.
- Felix, D; y Rikeros, D. (2015). Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el canton Durán
- Franke, I., e Insam, H. (2013). Treatment alternatives of slaughterhouse wastes, and their effect on the inactivation of different pathogens: A review. *Critical reviews in microbiology*, 39(2), 139–1.
- Galdames, L., y Díaz, A. (2015). Percepción y significado de la piedra en la geografía sagrada de las sociedades andinas. *Runa*, 36(2), 5–23.

- Gerbens, P., Mekonnen, M., y Hoekstra, A. (2013). The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems. *Water Resources and Industry*, 1, 25–36.
- Godoy, S., Martínez, S., Tomás, A., y Jover, M. (2016). Influence of filter medium type, temperature and ammonia production on nitrifying trickling filters performance. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1), 328–340.
- Gogina, E., e Yantsen, O. (2015). Research of biofilter feed properties. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(24), 44070–44074.
- Gómez, G. (2018). *Diseño de un filtro para reducir la turbidez de aguas residuales utilizando material litológico como medio filtrante* (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química).
- Gutiérrez, L. (2012). *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. Madrid, España.
- Harrison, J., y Daigger, G. (1987). A comparison of trickling filter media. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 679–685.
- Henrich, C., y Marggraff, M. (2013). Energy-efficient Wastewater Reuse—The Renaissance of Trickling Filter Technology. In *Proc. 9th International Conference on Water Reuse* (pp. 27–31).
- INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). 2013. Norma 2169: Agua. calidad del agua. muestreo. manejo y conservación de muestras.
- Irshad, A., Sureshkumar, S., Raghunath, B. V., Rajarajan, G., y Kumar, G. M. (2016). Treatment of waste water from meat industry. In *Integrated Waste Management in India* (pp. 251–263). Springer, Cham.
- Jaramillo, A., Togas, P., y Jhoel, J. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía–Morales, 2018.
- Jensen, P., Yap, S., Boyle, A., Janoschka, J., Carney, C., Pidou, M., y Batstone, D. J. (2015). Anaerobic membrane bioreactors enable high rate treatment of slaughterhouse wastewater. *Biochemical engineering journal*, 97, 132–141.
- Johns, M. (1995). Developments in wastewater treatment in the meat processing industry: A review. *Bioresource technology*, 54(3), 203–216.
- Kemal, N. 2016. A review on pumice for water and wastewater treatment. Turquía. Revista científica Desalination and Water Treatment. Vol 57(39). p 18131–18143.
- Khan, A., Gaur, R., Tyagi, V., Khursheed, A., Lew, B., Mehrotra, I., y Kazmi, A. A. (2011). Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating

- sewage: a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12), 1232–1251.
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1821-1830.
- Kornaros, M., y Lyberatos, G. (2006). Biological treatment of wastewaters from a dye manufacturing company using a trickling filter. *Journal of Hazardous Materials*, 136(1), 95–102.
- Krishna, G. G., Kumar, P., y Kumar, P. (2009). Treatment of low–strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). *Journal of Environmental management*, 90(1), 166–176.
- Ladino, Y. T. R., Ordóñez, L. F. R., y Miranda, J. P. R. (2017). Evaluación de un filtro percolador sin recirculación con medio de soporte en PVC para el tratamiento de aguas residuales combinadas (domésticas y pecuarias). *I+ D REVISTA DE INVESTIGACIONES*, 9(1), 38–48.
- Lekang, O. I., y Kleppe, H. (2000). Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural engineering*, 21(3), 181–199.
- Lemji, H. H., y Eckstädt, H. (2013). A pilot scale trickling filter with pebble gravel as media and its performance to remove chemical oxygen demand from synthetic brewery wastewater. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 14(10), 924–933.
- León, V. M., Lopez, C., Lara–Martín, P. A., Prats, D., Varó, P., y González–Mazo, E. (2006). Removal of linear alkylbenzene sulfonates and their degradation intermediates at low temperatures during activated sludge treatment. *Chemosphere*, 64(7), 1157–1166.
- Lesikar, B., y Persyn, R. (1999). On–site wastewater treatment systems. *Texas Agricultural Extension Service: the Texas A&M University system*.
- Li, C., Hwu, N., y Whang, J. (1984). Treatment of slaughterhouse wastewater by biofiltration tower. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Fixed–film Biological Processes*. US Army Corps Engineering Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Ill.
- Li, W., Loyola, C., Crowley, D., y Ahmad, Z. (2016). Performance of a two–phase biotrickling filter packed with biochar chips for treatment of wastewater containing high nitrogen and phosphorus concentrations. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 150–158.
- Liu, D., Li, C., Guo, H., Kong, X., Lan, L., Xu, H., ... y Ye, Z. (2019). Start–up evaluations and biocarriers transfer from a trickling filter to a moving bed bioreactor for synthetic mariculture wastewater treatment. *Chemosphere*, 218, 696–704.

- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 540-555.
- Masse, D. I., y Masse, L. (2000). Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems. *Canadian Agricultural Engineering*, 42(3), 139–146.
- Masse, L., Masse, D. I., y Kennedy, K. J. (2003). Effect of hydrolysis pretreatment on fat degradation during anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *Process Biochemistry*, 38(9), 1365–1372.
- Mittal, G. S. (2006). Treatment of wastewater from abattoirs before land application—a review. *Bioresource technology*, 97(9), 1119–1135.
- Moodie, S. P., y Greenfield, P. F. (1978). Treatment of abattoir effluent by trickling filtration. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 2741–2751.
- Morton, A., y Auvermann, B. (2001). Comparison of plastic trickling filter media for the treatment of swine lagoon effluent. In *2001 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers
- Muñoz, A. (2018). *Diseño y construcción de un modelo experimental de la fase de tratamiento biológico de aguas residuales* (Bachelor's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2018).
- Muñoz, T., y Reyes, R. (2013). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nitrógeno en un filtro percolador con nuevo empaque. *Revista mexicana de ingeniería química*, 12(3), 575–583.
- Muñoz. (2012). Sistema de tratamiento de aguas residuales de centro de faenamiento para una población menor de 2000 habitantes.
- Musa, M., Idrus, S., Hasfalina, C., y Daud, N. (2018). Effect of Organic Loading Rate on Anaerobic Digestion Performance of Mesophilic (UASB) Reactor Using Cattle Slaughterhouse Wastewater as Substrate. *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2220.
- Naz, I., Saroj, D. P., Mumtaz, S., Ali, N., y Ahmed, S. (2015). Assessment of biological trickling filter systems with various packing materials for improved wastewater treatment. *Environmental technology*, 36(4), 424–434.
- Obarska–Pempkowiak, H., Gajewska, M., y Wojciechowska, E. (2010). *Hydrofitowe oczyszczanie wód i ścieków* (pp. 1–307). Wydaw. Nauk. PWN.
- Oyarzun, P., Alarcón, L., Calabriano, G., Bejarano, J., Nuñez, D., Ruiz–Tagle, N., y Urrutia, H. (2019). Trickling filter technology for biotreatment of

- nitrogenous compounds emitted in exhaust gases from fishmeal plants. *Journal of environmental management*, 232, 165–170.
- Palatsi, J., Viñas, M., Guivernau, M., Fernandez, B., y Flotats, X. J. B. T. (2011). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: main process limitations and microbial community interactions. *Bioresource Technology*, 102(3), 2219–2227.
- Passeggi, M., López, I., y Borzacconi, L. (2012). Modified UASB reactor for dairy industry wastewater: performance indicators and comparison with the traditional approach. *Journal of Cleaner Production*, 26, 90–94.
- Phillips, S.A. (1975). Wastewater treatment plant handles cattle killing waste. *Water y Sewage Works*, 50–51.
- Quijije, P., y Aleja, C. (2016). *Proceso de faenamiento en el camal municipal y su efecto ambiental en la zona sur del Cantón Quevedo. Año 2016* (Master's thesis, Quevedo: UTEQ).
- Quispe, A., y Garcia, J. L. (2016). Optimización de los parámetros de calidad para recubrimientos en filtros percoladores y su aplicación como inhibidor de corrosión.
- Reina, L. (2015). *Evaluación de la eficiencia y cinética de remoción de materia orgánica en un reactor biológico aerobio horizontal con medio de soporte PET (Politereftalato de Etileno)* (Bachelor's thesis, Quito, 2015).
- Reyes, L. Y., R. Reyes Mazzoco. (2009). Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la remoción masica de un empaque estructurado en un filtro percolador. (En línea). Consultado el 08 de feb. 2019. <http://www.scielo.org.mx>.
- Ruiz, S. (2011). Plan de gestión de residuos del camal del Cantón Antonio Ante. *Trabajo de Tesis*). *Facultad de ingeniería civil y Ambiental, Escuela politécnica nacional. Quito–Ecuador*.
- Salminen, E., y Rintala, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. *Bioresource technology*, 83(1), 13–26.
- Sánchez, A; y Molina, Gabriela. 2015. Factibilidad para la implementación de sistemas de faenamiento y conservación de la carne de un centro de faenamiento en la ciudad de Calceta.
- Saucedo Terán, R. A., De la Mora Orozco, C., Barrientos Juárez, E., Gómez Rosales, S., y González Acuña, I. J. (2014). Tratamiento de aguas residuales de origen porcícola mediante un filtro percolador.
- SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo). 2017. Plan Nacional de Desarrollo 2017–2021 Toda una Vida. Quito, ECU. (En

línea). Consultado Formato (PDF). Obtenido de <http://www.planificacion.gob.ec>.

- Shahriari, T., y Shokouhi, M. (2015). Assessment of Bio-Trickling Filter Startup for Treatment of Industrial Wastewater. *International Journal of Environmental Research*, 9(2).
- Simsek, H., Kasi, M., Ohm, J. B., Blonigen, M., y Khan, E. (2013). Bioavailable and biodegradable dissolved organic nitrogen in activated sludge and trickling filter wastewater treatment plants. *water research*, 47(9), 3201–3210.
- Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresource technology*, 95(1), 1-10.
- Stefanakis, A., Bardiau, M., Trajano, D., Couceiro, F., Williams, J., Caplin, J., y Taylor, H. (2015). Removal of indicator bacteria and bacteriophages in a full-scale trickling filter-aerated constructed wetland wastewater treatment plant.
- Toro, H., y Andrés, J. (2018). Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Torres, P., Rodríguez, J. A., Suárez, C., Duque, Y., & Enríquez, L. (2016). Análisis del funcionamiento de la configuración del reactor anaerobio de flujo ascendente-filtro percolador para el tratamiento a escala real de aguas residuales domésticas. *Afinidad*, 73(576).
- Tritt, W. P., y Schuchardt, F. (1992). Materials flow and possibilities of treating liquid and solid wastes from slaughterhouses in Germany. A review. *Bioresource Technology*, 41(3), 235–245.
- Trujillo, A. F. O., y Cajigas, M. E. M. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 7(1), 143–155.
- TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). (2015). Acuerdo Ministerial 097–A Anexos de Normativa, reforma libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Quito, ECU. (En línea). Disponible en: <https://www.gob.ec>.
- US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 2004. Effluent limitations guidelines and new source performance standards for the meat and poultry products point source category. 2004. Disponible en: <https://federalregister.gov>.
- Valta, K., Kosanovic, T., Malamis, D., Moustakas, K., y Loizidou, M. (2015). Overview of water usage and wastewater management in the food and beverage industry. *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 3335–3347.

- Vásconez, V. (2018). *Análisis de la piedra pómez como filtro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Centro de Faenamiento Ocaña del cantón Quero* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil).
- Wang, L. K., Hung, Y. T., Lo, H. H., y Yapijakis, C. (Eds.). (2004). *Handbook of industrial and hazardous wastes treatment*. CRC Press.
- Winkler, M., & Straka, L. (2019). New directions in biological nitrogen removal and recovery from wastewater. *Current opinion in biotechnology*, 57, 50-55.
- World Bank Group, 2007. Environmental, Health and Safety (EHS) Guidelines for Meat Processing. General EHS Guidelines: Environmental Wastewater and Ambient Water Quality. Consultado 27 marzo del 2019. Disponible en: <http://www.ifc.org/ehsguidelines>.
- Wu, H., Yan, H., Quan, Y., Zhao, H., Jiang, N., y Yin, C. (2018). Recent progress and perspectives in biotrickling filters for VOCs and odorous gases treatment. *Journal of environmental management*, 222, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.001>.
- Yang, Z., Liu, J., Zhang, Y., Qin, Y., Xing, Y., y Li, J. (2018). Effective removal of n-butyl methacrylate in bio-trickling filter packed with ceramsite coated with activated carbon fibers. *International biodeterioration y biodegradation*, 133, 221–229.
- Zhang, Y., Cheng, Y., Yang, C., Luo, W., Zeng, G., y Lu, L. (2015). Performance of system consisting of vertical flow trickling filter and horizontal flow multi-soil-layering reactor for treatment of rural wastewater. *Bioresource technology*, 193, 424–432.
- Zurita, E. 2015. Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Pedro Vicente Maldonado. Tesis previa al título Ingeniería en Medio Ambiente.

ANEXOS

Anexo 1. Medición de caudales en el centro de faenamiento de Calceta durante dos semanas

Días		Caudal (m ³ /día)
1	Lunes	1,45
2	Martes	1,45
3	Miércoles	1,41
4	Jueves	1,45
5	Viernes	9,28
6	Sábado	1,97
7	Domingo	1,03
8	Lunes	1,52
9	Martes	1,18
10	Miércoles	1,19
11	Jueves	1,59
12	Viernes	9,03
13	Sábado	2,48
14	Domingo	1,29
	Lunes	1,48
	Martes	1,32
	Miércoles	1,30
Prome	Jueves	1,52
	Viernes	9,15
	Sábado	2,23
	Domingo	1,16
Medidas de tendencia central	Mínimo	1,03
	Máximo	9,28
	Media	2,59

Anexo 2. Certificación de análisis de parámetros físico-químicos del agua residual del Centro de faenamiento de Calceta, post tratamiento.



INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO QUÍMICO AMBIENTAL

ANÁLISIS: Físicoquímico de Muestras de Agua
MC22.1
Revisión: 8
Orden de trabajo N° OT-2019-A-23

CIU: NA R: A0027-19

CLIENTE: EMPRESA: KELLY MENDOZA ORTEGA DIRECCIÓN: Calle Eduardo Ortega, Ciudadela Mercedita TELÉFONO: 0996651754 SOLICITADO POR: Kelly Mendoza Ortega PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS: NA	TIPO DE MUESTRAS: Agua Residual CODIGO DE MUESTREO: # 1 CUERPO RECEPTOR: Alcantarillado LOCALIZACIÓN DE DESCARGA: NI
---	---

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE**	METODOS	U (k=2)	Primer Trimestre A0027-19	CUMPLE (✓)
CONDICIONES AMBIENTALES	TEM AMB (°C):	20,8				
	HUMEDAD (%):	93				
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO		NI				
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA		Cliente				
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)		Compuesta				
FECHA DE TOMA DE MUESTRA		2019/02/11-2019/02/16				
HORA DE TOMA DE MUESTRA		18:52				
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA		2019/02/22				
HORA DE INGRESO		10:00				
FECHA DE ANÁLISIS		2019/02/22 - 2019/03/08				
FECHA DE REALIZACIÓN DE INFORME		2019/03/07				
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME		Paulina Llivo				
Conductividad Eléctrica	µS/cm	NA	PEE15/ SM-Ed-23 2017,2510 B	1,6%	<84,0	NA
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/L	250,0	PEE11/SM-Ed-23 2017, 5210D.	15%	1000	NC
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	500,0	PEE03/ SM- Ed 23 2017, 5220 D.	2%	5000	NC
Potencial Hidrógeno	un pH	6 - 9	PEE02/ SM Ed 23 2017, 4500 H+B	0,90%	7,06	C
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	NA	PEE15/ SM-Ed-23 2017,2510 B	17%	1391	NA
Sólidos Sedimentables	ml/L	20,0	PEE 10/ SM-ED-23 2017, 2540-F	6%	7,8	C
Sólidos Suspensos Totales	mg/L	220,0	PEE07/ SM Ed-23 2017, 2540D	10%	2906	NC
Sólidos Totales	mg/L	1600,0	PEE06/ SM Ed-23 2017, 2540 B	5%	4307	NC

** Según Anexo 1 del libro VI del TULSMA del 30 de Julio del 2015, AM 007-A. Tabla 8 Límites de descarga al sistema de alcantarillado público
(1) Las opiniones e interpretaciones que se indican a continuación, están fuera del alcance de la acreditación del SAE



Dr. Lulu Soto
RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
SM= Standard Methods; EPA=Environmental Protection Agency; TNRCC 1005=Texas Natural Resource Commissions;
PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo

U : Incertidumbre del Método

- El informe solo afecta a las muestras sometidas a ensayo
- Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio
- Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
- El valor de DBOS fue 9250 mg/L. Valor comprendido fuera del alcance de acreditación de SAE
- El valor de DQO fue 18540 mg/L. Valor comprendido fuera del alcance de acreditación de SAE
- El valor de Sólidos Suspensos Totales fue 1320,0 mg/L. Valor comprendido fuera del alcance de acreditación de SAE
- El valor de Sólidos Totales fue 9199,9 mg/L. Valor comprendido fuera del alcance de acreditación de SAE

Anexo 3. Mediciones de pH y carga orgánica, durante los 21 días en un intervalo de tiempo de tres días.

Días	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	pH
3	1000	5000	7.06
6	938	4579	7.11
9	915	3395	7.13
12	834	2786	7.19
15	724	1567	7.28
18	546	936	7.32
21	206	480	7.46

Anexo 4. Certificación de análisis de parámetros físico-químicos del agua residual del Centro de faenamiento de Calceta, post tratamiento.



INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO QUIMICO AMBIENTAL

ANÁLISIS: Físicoquímico de Muestras de Agua
 MC22.1
 Revisión: 8
 Orden de Trabajo N° OT-2019-A-36

CIU: NA R: A0051-19

CLIENTE: EMPRESA: KELLY MENDOZA ORTEGA DIRECCIÓN: Calle Eduardo Ortega, Ciudadela Mercedita TELEFONO: 0995651754 SOLICITADO POR: Kelly Mendoza Ortega PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS: NA	TIPO DE MUESTRAS: Agua Residual CODIGO DE MUESTREO: #1 CUERPO RECEPTOR: Alcantarillado LOCALIZACIÓN DE DESCARGA: Centro de Faenamiento - Calceta
--	---

CONDICIONES AMBIENTALES	TEM AMB (°C):	19,3								
	HUMEDAD (%):	63								
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO		NI								
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA		Cliente								
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)		Simple								
FECHA DE TOMA DE MUESTRA		2019/03/27								
HORA DE TOMA DE MUESTRA		10:00								
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA		2019/03/28								
HORA DE INGRESO		13:00								
FECHA DE ANALISIS		2019/03/28 - 2019/04/08								
FECHA DE REALIZACIÓN DE INFORME		2019/04/08								
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME		Cristofer Sánchez								
PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE**	METODOS	U (k=2)	Especial A0051-19	CUMPLE (C)				
Conductividad Eléctrica	µS/cm	NA	PEE15/ SM-Ed-23 2017,2510 B	2,5%	<84,0	NA				
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	mg/L	250,0	PEE11/SM-Ed-23 2017, 5210D	15%	206	C				
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	500,0	PEE03/ SM- Ed 23 2017, 5220 D	2%	480	C				
Potencial Hidrógeno	un pH	6 - 9	PEE02/ SM Ed 23 2017, 4500 H+B	0,90%	7,46	C				
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	NA	PEE15/ SM-Ed-23 2017,2510 B	2%	1000,9	NA				
Sólidos Sedimentables	ml/L	20,0	PEE 10/ SM-ED-23 2017, 2540-F	16%	1,1	C				
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	220,0	PEE07/ SM Ed-23 2017, 2540D	14%	212,0	C				
Sólidos Totales	mg/L	1600,0	PEE06/ SM Ed-23 2017, 2540 B	5%	1314	C				

** Según Anexo 1 del libro VI del TULSMA del 30 de Julio del 2015, AM 097-A, Tabla 8 Límites de descarga al sistema de alcantarillado público
 (†) Las opiniones e interpretaciones que se indican a continuación, están fuera del alcance de la acreditación del SAE



Dr. Luis Solo
RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
 SM= Standard Methods; EPA=Environmental Protection Agency; TNRC 1005=Texas Natural Resource Commissions;
 PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo

U : Incertidumbre del Método

- El informe solo afecta a las muestras sometidas a ensayo
- Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio
- Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
- El valor de Sólidos Disueltos Totales fue 1084 mg/L. Valor comprendido fuera del alcance de acreditación de SAE

Anexo 5. Cálculo de la Eficiencia de parámetros analizados.

Parámetros	Inicial P₁	Final P_F	Diferencia (D)	Relación (D/P₁)	Eficiencia
SDT	1391	1100.9	290.10	0.2086	20.86
SS	7.8	1.1	6.70	0.859	85.90
SST	2908	212	2696.00	0.9271	92.71
ST	4307	1314	2993.00	0.6949	69.49
DBO ₅	1000	206	794.00	0.794	79.40
DQO	5000	480	4520.00	0.904	90.40

Anexo 6. Fotografías de la caracterización del efluente residual procedente del centro de faenamiento de Calceta.



Anexo 6a. Medición de los caudales del agua residual del centro de faenamiento.



Anexo 6b. Muestreo del agua residual del centro de faenamiento.

Anexo 7. Fotografías del proceso de construcción del filtro percolador.



Anexo 7a. Acondicionamiento de las características del medio filtrante.



Anexo 7b. Reservorio para el almacenamiento del agua residual.



Anexo 7c. Filtro percolador del sistema de tratamiento.



Anexo 7d. Distribuidor de flujo fijo del filtro percolador.



Anexo 7e. Recipiente de recirculación del agua filtrada.



Anexo 7f. Pruebas de velocidad del filtro percolador



Anexo 7g. Representación del sistema de filtro percolador.

Anexo 8. Fotografías del tratamiento de aguas residuales con el filtro percolador.**Anexo 8a.** Agua sintética.**Anexo 8b.** Aplicación del agua sintética.**Anexo 8c.** Biopelícula formada.**Anexo 8d.** Pre filtración del agua residual.



Anexo 8e. Agua residual tratada.