

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Evaluación del sistema anaeróbico múltiple mixto (SAMM) de aguas residuales domésticas de una urbanización en Guayaquil para la remoción de tensoactivos a niveles aceptables para la descarga de efluentes

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Sonia Estefanía Arcentales Dueñas

Jennifer Stefanya Zambrano Aranea

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico principalmente a mis padres, por su apoyo incondicional y sacrificios a lo largo de toda mi vida académica. A mis hermanos, por estar en toda etapa de mi vida presentes, acompañándome y siendo un soporte moral. A mi enamorado, que siempre estuvo para mí en la elaboración del proyecto, por su motivación, paciencia y tiempo.

-Sonia Arcentales.

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Yenny Aranea y Humberto De la Cruz, por brindarme el apoyo, las fuerzas y el amor incondicional para poder conseguir mis metas académicas y personales. A mi mascota Zoa por haberme acompañado en largas noche de desvelo durante toda mi carrera.

-Jennifer Zambrano

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestra tutora Suanny Mosquera que nos acompañó durante el desarrollo del proyecto impartiéndonos sus conocimientos y apoyo incondicional.

A la Ing. Francesca Escala por su asesoría con todas las dudas de la Planta de Tratamientos en la que se basó el presente proyecto y por su ayuda gestionando el ingreso en cada visita para la toma de muestras.

A la empresa Aguapen-EP y a todo el Departamento de control de calidad por abrirnos las puertas de sus instalaciones para llevar a cabo los experimentos necesarios. Al laboratorio de investigación en ecosistemas acuáticos de ESPOL y su personal por brindarnos los recursos necesarios para la finalización de los experimentos. Gracias a todas aquellas personas que aportaron con su granito de arena para que la tesis pudiera ser llevada a cabo exitosamente.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Arcentales Dueñas Sonia Estefania* y *Zambrano Aranea Jennifer Stefanya* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Sonia Estefania
Arcentales Dueñas



Jennifer Stefanya
Zambrano Aranea

EVALUADORES

.....
Nadia Flores Manrique

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Suanny Mosquera Romero

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Basados en la normativa ecuatoriana, un efluente de una Planta de Tratamientos de Agua Residual (PTAR) situada en un sector urbanístico de Guayaquil ha presentado parámetros que sobrepasan el límite permisible de descarga a un cuerpo de agua dulce. Las concentraciones del parámetro de tensoactivos son las más elevadas, lo cual se evidencia por la cantidad excesiva de espuma en la fase después del tratamiento biológico. Por ello, se propuso la utilización del Proceso de Oxidación Avanzada (POA) UV/H₂O₂ para el tratamiento de tensoactivos. Se construyó un sistema Batch a escala de laboratorio con concentraciones de peróxido de hidrógeno a 100, 250 y 500 ppm y con un tiempo de exposición UV de 15, 30, 60 y 120 minutos para cada concentración. Considerando los resultados en Batch, se diseñó un sistema continuo con un caudal 60 veces menor que el de la planta (0.0145 L/s) y con una concentración de H₂O₂ (18300 ppm) que simule la relación de tiempo de reacción encontrada en los experimentos anterior. Se realizó la prueba con exposición UV desde 1 a 4 pasos, para analizar la incidencia de la luz UV en el sistema continuo. En un sistema Batch se puede obtener una remoción superior al 90% en 60 minutos al dosificar 250 ppm, presentando también una reducción significativa de coliformes totales. El sistema continuo con 18300ppm de H₂O₂, proporcional a la concentración adecuada en Batch, obtuvo una remoción del 14.7% de tensoactivos. Lo cual demostró que el sistema en continuo no representa una solución viable para el tratamiento del efluente, mostrando que existe un efecto sinérgico entre el tiempo de residencia, la concentración de H₂O₂, y la recirculación del agua en un sistema cerrado. Por lo cual, se propone un prototipo del sistema Batch a escala piloto con su análisis de costo, cuya viabilidad técnica demuestra ser alta, mientras que la económica presenta una inversión inicial elevada de aproximadamente \$2272.

Palabras Clave: Tensoactivos, Coliformes totales, Proceso de oxidación avanzada, UV/H₂O₂, Sistema Batch

ABSTRACT

Based on Ecuadorian regulations, an effluent from a wastewater treatment plant (WWTP) located in an urban sector of Guayaquil has presented parameters that exceed the permissible limit for discharge into a freshwater body. The concentrations of the surfactant parameter are the highest, which is evidenced by the excessive amount of foam in the phase after biological treatment. Therefore, the use of the UV/H₂O₂ Advanced Oxidation Process (AOP) for surfactant treatment was proposed. A laboratory scale Batch system was constructed with hydrogen peroxide concentrations at 100, 250 and 500 ppm and UV exposure time of 15, 30, 60 and 120 minutes for each concentration. Considering the Batch results, a continuous system was designed with a flow rate 60 times lower than that of the plant (0.0145 L/s) and with a H₂O₂ concentration (18300 ppm) that simulates the reaction time relationship found in the previous experiments. The test was performed with UV exposure from 1 to 4 steps, to analyze the incidence of UV light in the continuous system. In a batch system, a removal of more than 90% can be obtained in 60 minutes when dosing 250 ppm, also presenting a significant reduction of total coliforms. The continuous system with 18300ppm of H₂O₂, proportional to the appropriate concentration in Batch, obtained a removal of 14.7% of surfactants. This demonstrated that the continuous system does not represent a viable solution for effluent treatment, showing that there is a synergistic effect between residence time, H₂O₂ concentration, and water recirculation in a closed system. Therefore, a prototype of the Batch system is proposed at pilot scale with its cost analysis, whose technical feasibility proves to be high, while the economic feasibility presents a high initial investment of approximately \$2272.

Keywords: Coliforms, Advanced Oxidation Process, UV/H₂O₂, Batch System

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	10
1. Introducción	10
1.1 Descripción del problema	11
1.2 Justificación del problema.....	11
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Marco teórico	14
1.4.1 Sistema Anaerobio Mixto Múltiple (SAMM)	14
1.4.2 Contaminantes en los efluentes y su efectiva remoción.....	15
1.4.3 Métodos de tratamientos de agua residual usados para remover tensoactivos y patógenos	19
1.4.4 Fundamento teórico de la tecnología seleccionada	23
CAPÍTULO 2	27
2. Metodología	27
2.1 Población y muestra	27
2.2 Muestreos en la Planta de Tratamientos de Agua Residual	28

2.3	Evaluación del estado de remoción de materia orgánica del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto.....	29
2.4	Construcción del sistema UV/H ₂ O ₂ a escala laboratorio.....	31
2.4.1	Sistema Batch UV/H ₂ O ₂	31
2.4.2	Reactor UV.....	32
2.4.3	Sistema Continuo UV/H ₂ O ₂	34
2.5	Diseño y desarrollo de experimentos.....	35
2.5.1	Método de análisis de tensoactivos.....	36
2.5.2	Método de análisis de peróxido de hidrógeno.....	37
2.5.3	Experimentos de control.....	38
2.5.4	Experimentos con el sistema batch UV/H ₂ O ₂ para remoción de tensoactivo del efluente de agua residual doméstica	38
2.5.5	Experimentos con el sistema continuo UV/H ₂ O ₂ para remoción de tensoactivo del efluente de agua residual doméstica	39
2.5.6	Variables que afectan la remoción de tensoactivos del sistema.	40
2.6	Procedimiento para la identificación de colonias de coliformes presentes en el agua residual doméstica de la PTAR.....	41
2.6.1	Preparación del medio de cultivo MacConkey	41
2.6.2	Inoculación de las muestras de agua en placas de cultivo MacConkey.	41
CAPÍTULO 3.....		42
3.	Resultados Y Análisis	42
3.1	Resultados y análisis de la remoción de materia orgánica del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto.....	42
3.2	Resultados y análisis de los experimentos del sistema Batch UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno.	44
3.2.1	Resultados y análisis del peróxido residual de los experimentos del sistema Batch UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio.....	46

3.3	Resultados y análisis de los experimentos del sistema continuo UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio	47
3.4	Resultados y análisis microbiológicos de coliformes en el agua tratada por el sistema UV/H ₂ O ₂	48
3.5	Diseño de sistema Batch UV/H ₂ O ₂ para prueba piloto en la PTAR	50
3.6	Análisis de costos	52
CAPÍTULO 4		54
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	54
	Conclusiones	54
	Recomendaciones	56
BIBLIOGRAFÍA.....		58
APÉNDICES		60

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PTAR	Planta de Tratamientos de Agua Residual
MAAE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica
POA	Proceso de Oxidación Avanzada
SAMM	Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto
SAAM	Sustancias Activas de Azul de Metileno

SIMBOLOGÍA

ppm	Partes por millón
mg	Miligramo
l	Litro
m ³	Metro cúbico
pH	Potencial de Hidrógeno
m	Metro
N	Nitrógeno
C	Carbono
P	Fósforo
UV	Ultravioleta
s	Segundos
UFC	Unidades Formadoras de colonias

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Aguas Residual	15
Figura 1.2 La estructura simplificada de un surfactante con un grupo hidrófilo unido a un grupo hidrofóbico	17
Figura 1.3 Resumen de diferentes tipos de membranas para tratamiento de aguas (Bluegold 2020).....	20
Figura 1.4 Mecanismo de Coagulación-Floculación	21
Figura 2.1 Salida del efluente del Filtro Facultativo de la PTAR	27
Figura 2.2 Procedimiento para la toma de muestras en la PTAR	28
Figura 2.3 Observación microbiológica en muestra de agua	30
Figura 2.4 Esquema del sistema batch UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 2.5 Sistema de tratamiento batch UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 2.6 Esquema del sistema continuo UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 2.7 Sistema de tratamiento continuo UV/H ₂ O ₂ a escala de laboratorio	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 2.8 Procedimiento para la experimentación del sistema UV/H ₂ O ₂	39
Figura 3.1 Caudales medidos del efluente del Filtro Facultativo.....	42
Figura 3.2 Bacterias filamentosas encontrados en muestra de agua obtenida de la salida del filtro facultativo de la PTAR.....	44
Figura 3.3 Gráfico Remoción de Tensoactivos (%) vs tiempo (min) de los resultados del Sistema UV/H ₂ O ₂ a concentraciones de H ₂ O ₂ a 100, 250, 500 ppm.....	45
Figura 3.4 Gráfico concentración H ₂ O ₂ residual (mg/l) vs tiempo (min) para los experimentos del sistema Batch	46
Figura 3.5 Relación de la concentración de H ₂ O ₂ con respecto al caudal tratado.	47
Figura 3.6 Presencia abundante de colonias de coliformes en muestra de agua sin tratamiento UV/ H ₂ O ₂	49

Figura 3.7 Colonia de coliforme después de tratamiento UV/ H ₂ O ₂	49
Figura 3.8 Comportamiento de la Turbidez en relación con el tiempo de exposición del agua en el sistema.	50
Figura 3.9 Propuesta de diseño del sistema Batch a escala piloto para la PTAR	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Algunos parámetros de Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (MAAE-Acuerdo Ministerial 097-A 2015)	12
Tabla 1.2 Algunos de los tensoactivos más utilizados (Ying 2006).....	18
Tabla 1.3 Impactos ambientales de los principales contaminantes del agua residual (Riffat 2015)	19
Tabla 1.4 Procesos de oxidación avanzada más utilizados (Bes Monge et al. 2016)	23
Tabla 2.1 Muestreos realizados en la PTAR.....	Error! Bookmark not defined.
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas la Bomba Sumergible y Tanque Batch empleados	32
Tabla 2.3 Características y especificaciones técnicas del reactor fotoquímico	33
Tabla 2.4 Dosis UV para cada tiempo de residencia	33
Tabla 2.5 Materiales y equipos utilizados durante el trabajo de campo y laboratorio	35
Tabla 2.6 Corridas analíticas realizadas del sistema UV/H ₂ O ₂	37
Tabla 2.7 Identificación de Variables dependientes e independientes del sistema ..	40
Tabla 3.1 Análisis de laboratorio certificado	43
Tabla 3.2 Resultados de la corrida del sistema continuo a escala de laboratorio.....	48
Tabla 3.3 Tabla de especificaciones de precios para equipos y materiales del diseño piloto	52
Tabla 3.4 Aproximación de gasto mensual energético	52

CAPÍTULO 1

1. Introducción

El agua es un recurso natural importante para la salud pública, por lo cual, la mejora del abastecimiento, saneamiento y la gestión de los recursos hídricos, puede conllevar al crecimiento económico de los países. En Ecuador, los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) cumplen con un rol importante en la prestación de servicios de gestión integral de residuos sólidos, agua potable, alcantarillados, tratamiento de aguas residuales, entre otros. Para el año 2020 se reportó que el 73.8% de GADM realizan tratamientos de aguas residuales previo a su descarga final, mientras que el 23% no realizan ningún tratamiento (INEC 2021).

La ciudad de Guayaquil, con una población aproximada de 2'644.891, es una de las más importantes del Ecuador conocida como uno de los principales pilares de desarrollo social y económico (INEC 2017). En Guayaquil, la cobertura en agua potable es del 95% y de alcantarillado sanitario un 90%. Las redes de alcantarillado sanitario de la ciudad están diseñadas para descargar en los ríos Daule-Guayas mientras que el drenaje pluvial en el Estero Salado. No obstante, el sector Vía a la Costa ha tenido un desarrollo urbanístico acelerado en los últimos diez años, resultando en que la provisión de los servicios como el alcantarillado sanitario tiene una limitada tasa de cobertura (El Universo 2018). Esto ha afectado no solo a los usuarios si no también al canal de agua dulce a donde se dirigen las descargas.

En el sector Vía la Costa cada una de las urbanizaciones cuenta con una planta de tratamientos de agua residual doméstica (PTAR). Las PTARs son construidas por los promotores inmobiliarios como una solución a la ausencia de una red pública en el sector. Una PTAR situada en una urbanización del sector mencionado, ha presentado parámetros que sobrepasan el límite permisible de descarga de la norma ecuatoriana. En especial se ha detectado que las concentraciones de tensoactivos son elevadas, ya que, se evidencia una cantidad excesiva de espuma en la cámara después del tratamiento biológico.

1.1 Descripción del problema

El sector Vía a la Costa no posee un sistema de alcantarillado sanitario definido. Al no contar con ríos, sino solo tener causes estacionales para las aguas residuales, se vuelve imprescindible que se cumpla con la calidad requerida para su descarga. La urbanización ubicada en dicho sector cuenta con una planta de tratamiento con un Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto (SAMM) que fue implementada en el año 2015. No obstante, el sistema de tratamiento de estas aguas residuales domésticas no se encuentra estabilizado, ya que no ha recibido los controles y mantenimientos periódicos correspondientes por la ausencia de un operario hasta mayo del 2022. Esto ha causado que algunos parámetros como tensoactivos y coliformes fecales resulten elevados evidenciándose por los análisis en un laboratorio acreditado. Por este motivo, es necesario evaluar mejoras de diseño y parámetros óptimos para una operación eficiente de la Planta de Tratamientos de Agua Residual doméstica y así cumplir con los parámetros contemplados en la normativa ambiental ecuatoriana.

1.2 Justificación del problema

El sector Vía la costa está ubicado en la ciudad de Guayaquil y tiene un desarrollo urbanístico en constante crecimiento. Cada una de las urbanizaciones cuentan con una planta de tratamientos de agua residual. Al presente no existe una red pública de alcantarillado sanitario, por este motivo todas las descargas son dirigidas a causes estacionales. En este caso de estudio, se analiza una PTAR ubicada en una urbanización de dicho sector, la cual recibe aproximadamente 479 m³/día de agua residual doméstica de los habitantes de dicha urbanización. El agua es tratada y posteriormente se descarga a un cauce de río natural de bajo caudal, por lo que, es necesario que cumpla con los parámetros de descarga permitidos por los entes reguladores.

Herramientas necesarias para el aseo personal y del hogar, como detergentes, shampoos, jabones de lavar platos, entre otros, se han convertido en la fuente principal de tensoactivos en las aguas residuales. Estos productos contienen en su formulación un compuesto orgánico conocido como tensoactivos, y provocan la presencia de espuma no deseada en los efluentes cuando no se remueve apropiadamente.

El presente proyecto busca proponer una solución a los elevados niveles de tensoactivos presentes en la PTAR mediante la investigación del funcionamiento de las tecnologías y posterior experimentación de la mejor tecnología que se pueda aplicar en estos casos. La presencia de este compuesto representa un efecto tóxico para la vida acuática y vegetal, al ser una sustancia difícil de degradar. La presencia de altas concentraciones de tensoactivos en el agua ocasiona problemas en el medio ambiente ya que puede afectar a los organismos que habitan en él y causar desnaturalización de proteínas, enfermedades de la piel, entre otros (Krishnan, et al., 2016).

La PTAR debe cumplir con la Normativa de Calidad ambiental vigente del país. En el Anexo 1 LIBRO TULSMA ACUERDO MINISTERIAL 097A (2015-11), se establece los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce y los límites para el agua que se deseen utilizar con otros propósitos. Se detalla en la tabla 1.1 los parámetros de descarga que se consideran de mayor relevancia para el presente proyecto.

Tabla 1.1 Algunos parámetros de Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (MAAE-Acuerdo Ministerial 097-A 2015)

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permitido
Cloro activo	Cl	mg/l	0.5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200

Demanda Bioquímica de Oxígeno	DBO ₅	mg/l	100
Potencial de hidrógeno	pH		6 - 9
Tensoactivos	Sustancias Activas de Azul de Metileno	mg/l	0.5

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer un sistema de oxidación avanzada en la planta de tratamientos de agua residual de una urbanización mediante la experimentación a escala laboratorio para la reducción de contaminantes que excedan la normativa de descarga.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un prototipo a escala de laboratorio de un sistema (UV/H₂O₂), aplicando los fundamentos del proceso de oxidación avanzada fotoquímica para la eliminación de tensoactivos
- Promover la remoción de coliformes totales empleando el sistema propuesto para el cumplimiento de la normativa vigente.
- Evaluar la viabilidad del prototipo planteado para la implementación del sistema en la Planta de Tratamientos de Agua Residual.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Sistema Anaerobio Mixto Múltiple (SAMM)

En el año 2015 se instauró una planta de tratamientos de agua residual doméstica de acuerdo con un Sistema Anaerobio Mixto Múltiple (SAMM). El SAMM se diseñó para una población de 1916 personas con una dotación de agua potable de 250 litros/habitante-día y con un caudal de diseño de 430 m³/día. El SAMM es un proceso de cuatro etapas: uno mecánico, dos biológicos de degradación anaeróbica de la materia orgánica carbonosa y otro último proceso de tipo facultativo.

La ETAPA I es un tratamiento preliminar, donde primero se realiza la remoción de sólidos de gran tamaño y grasas libres mediante rejillas. Posteriormente, se encuentra un tanque para homogenizar el flujo entrante, tanto en caudal como en composición. La ETAPA II es un tratamiento primario en donde se lleva a cabo un proceso biológico con tres Reactores de "Baffles" operando en paralelo. En esta etapa, como productos finales se tienen sólidos no biodegradables, como son los humus que deben ser retirados con cierta periodicidad. La ETAPA III es un tratamiento secundario que involucra un proceso biológico en tres filtros percoladores de flujo a pistón en paralelo, denominado Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA). El tratamiento de la ETAPA II y ETAPA III operan de manera anaerobia con bacterias predominantes metanogénicas y por ello como productos finales se obtienen gases constituidos por CO₂, CO, H₂, CH₄. Finalmente, la ETAPA IV es un tratamiento terciario que se da en un filtro percolador de flujo a pistón horizontal denominado "Filtro Facultativo", este digestor cuenta con un proceso biológico que permite mediante las raíces de plantas realizar adsorción y asimilación fitológica, además de introducir cierta cantidad de oxígeno en el lecho digestor. El Filtro Facultativo tiene al final una cámara de recibo de efluente en donde se realiza su desinfección con la adición de hipoclorito de sodio (Buenaventura, 2015).

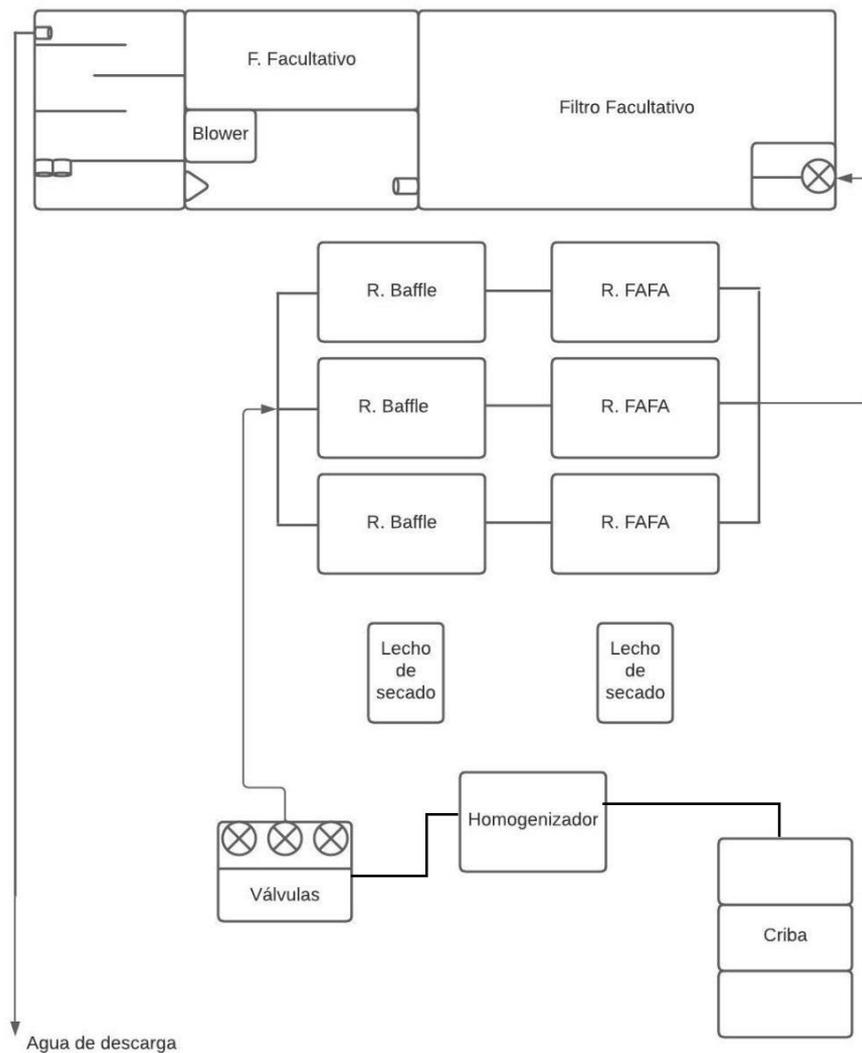


Figura 1.1 Diagrama de la Planta de Tratamiento de Aguas Residual

1.4.2 Contaminantes en los efluentes y su efectiva remoción

1.4.2.1 Material orgánico persistente

Las aguas residuales domésticas o municipales tienen como principales constituyentes materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos. Cuando existe la presencia de altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo se pueden evidenciar problemas, pues los nutrientes en mención tienen la capacidad de acelerar la eutrofización en lagos. Las aguas residuales también pueden contener contaminantes como metales pesados, compuestos tóxicos y compuestos orgánicos refractarios, sin embargo, estos son más comunes en aguas residuales de tipo industrial (Riffat 2015).

El tratamiento biológico para aguas residuales implica la conversión o destrucción de contaminantes mediante microorganismos. La materia orgánica biodegradable es reducida y/o eliminada de las aguas residuales para llegar a un nivel aceptable de acuerdo con los límites reglamentarios vigentes. El tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales se da en ausencia de oxígeno e implica una conversión biológica de compuestos orgánicos en metano y dióxido de carbono.

Es importante monitorear también la relación existente entre los nutrientes Carbono (C), Nitrógeno (N) y fósforo (P) en el sistema ya que un desbalance de nutrientes generalmente se correlaciona con un mayor número de células bacterianas o el exceso o decaimiento del crecimiento de otras bacterias competidoras que no realicen el trabajo de remoción adecuado. La relación ideal C: N: P para procesos biológicos anaeróbicos podría variar desde 250: 5: 1 a 500: 5: 1 (Thompson et al. 2006)

1.4.2.2 Coliformes Totales

Los coliformes totales son indicadores que engloban a los coliformes fecales y ambos se utilizan como indicadores de la calidad sanitaria del agua. Este último indicador, agrupa a las bacterias termotolerantes que representan a los posibles microorganismos patógenos entéricos. Los patógenos se transmiten generalmente en el intestino del hombre y en el de los animales, a través de las excretas, y comúnmente, por la ingestión o el contacto con agua contaminada, formando parte de la contaminación bacteriológica de ríos y playas (Mora Molina and Calvo Brenes 2010). Por ello es importante tener en consideración la cantidad permisible de descarga a cauces de agua dulce como se señala en la Tabla 1.1.

1.4.2.3 Tensoactivos

Los tensoactivos o surfactantes ingresan a las aguas residuales principalmente por las descargas de los desechos acuosos del lavado

doméstico e industrial, y otras actividades de limpieza. Un tensoactivo combina en sola molécula un grupo fuertemente hidrofóbico con un grupo fuertemente hidrofílico (Palmer and Hatley 2018). La estructura simplificada de un tensoactivo se muestra en la Figura 1.2. Los tensoactivos son ampliamente utilizados para bajar la tensión superficial entre dos líquidos o entre un sólido y un líquido. Esto, los hace adecuados para la producción de detergentes, agentes humectantes, emulsionantes, agentes espumantes y dispersantes (Krishnan, Chandran, and Sinnathambi 2016).

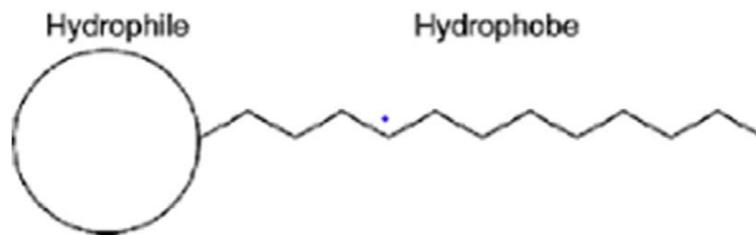


Figura 1.2 La estructura simplificada de un surfactante con un grupo hidrófilo unido a un grupo hidrofóbico

Los tensoactivos se pueden normalmente clasificar según la carga eléctrica de la parte hidrofílica de la molécula pudiendo ser: aniónicos, catiónicos y no aniónicos. En los tensoactivos aniónicos el grupo hidrófilo está cargado negativamente como un sulfonato o un carboxilo. Los catiónicos tiene un grupo hidrófilo cargado positivamente como el amonio cuaternario o el fosfonio. Los tensoactivos no iónicos tienen un grupo hidrófilo no ionizado como el óxido de etileno polimerizado. Los tensoactivos más comunes son los aniónicos se encuentran presentes alrededor del 60% de la producción mundial de tensoactivos mientras que los no iónicos representan el 30% y los anfótero y catiónicos un 10% (Palmer & Hatley, 2018). Por esta razón, se espera que el contenido de tensoactivos en el caso de estudio sea mayormente de tipo aniónico.

Tabla 1.2 Algunos de los tensoactivos más utilizados (Ying 2006)

Clase de Tensoactivo	Nombre del Tensoactivo
Aniónico	Sulfonatos de alquilbenceno lineal (LAS) Sulfonatos de alcanos secundarios (SAS) Sulfatos de éter de alcohol (Alquil etoxi) (AES)
Catiónico	Compuestos a base de amonio cuaternario (QAC) Haluros de alquiltrimetilamonio (TMAC) Haluros de alquildimetilamonio (DMAC)
No iónico	Etoxilatos de alquifenol (APE o APEO) Etoxilatos de alcohol (AE o AEO)

1.4.2.3. Impactos ambientales de los contaminantes persistentes

Existen contaminantes en el agua residual que no se remueven con facilidad y pueden perjudicar al medio ambiente, en la Tabla 1.3 se describen los impactos ambientales de los principales contaminantes del agua residual.

Por otro lado, el consumo de productos de limpieza y aseo personal hace que aumente gradualmente los tensoactivos en efluentes, este contaminante provoca cambios en el ecosistema afectando la vida acuática y a la vegetación (Moncada Fuentes and Cubillos Alarcón 2006), asimismo son los principales responsables de formación de espumas en cuerpos de agua (Moncada Fuentes and Cubillos Alarcón 2006).

Estudios han revelado que los tensoactivos sintéticos, así como sus subproductos pueden causar efectos sobre la salud y el medio ambiente, estos representan un gran problema para la vida acuática debido al efecto tóxico y así como también el potencial para alterar los sistemas hormonales de los organismos acuáticos (Krishnan et al. 2016).

Tabla 1.3 Impactos ambientales de los principales contaminantes del agua residual (Riffat 2015)

Contaminante	Fuente	Impacto ambiental en las aguas receptoras
Sólidos Suspendidos	Aguas Residuales Municipales, Aguas Pluviales	Capa de escoria en la superficie, depósito de lodos
Materia Orgánica	Aguas Residuales Municipales, Posibles Aguas Residuales Industriales	Agotamiento de oxígeno disuelto, condiciones anaeróbicas, muerte de peces
Nutrientes	Aguas Residuales Municipales, Aguas Residuales Industriales	Eutrofización y deterioro de la calidad de agua
Patógenos	Aguas Residuales Municipales,	Transmisión de enfermedades
Metales Pesados	Aguas Residuales Municipales,	Tóxico para la vida acuática
Orgánicos Refractarios	, Aguas Residuales Industriales	Puede ser tóxico o cancerígeno
Compuestos disruptores endócrinos	Aguas Residuales Municipales,	Feminización de los peces, posible alcance más amplio de los impactos

1.4.3 Métodos de tratamientos de agua residual usados para remover tensoactivos y patógenos

Se revisó la literatura con un enfoque mayor a la remoción de tensoactivos, lo cuales son contaminantes recalcitrantes y que, conociendo la naturaleza de la tecnología, es posible que se realice la remoción de patógenos de manera simultánea.

1.4.3.1 Filtración de membrana

Las membranas son láminas delgadas elaboradas con materiales que capaces de separar contaminantes del agua, de tal forma que el agua y las sales disueltas pasan a través de la membrana mientras que las

partículas contaminantes son retenidas. En la Figura 1.3 se muestra algunas características de los diferentes tipos de membranas.

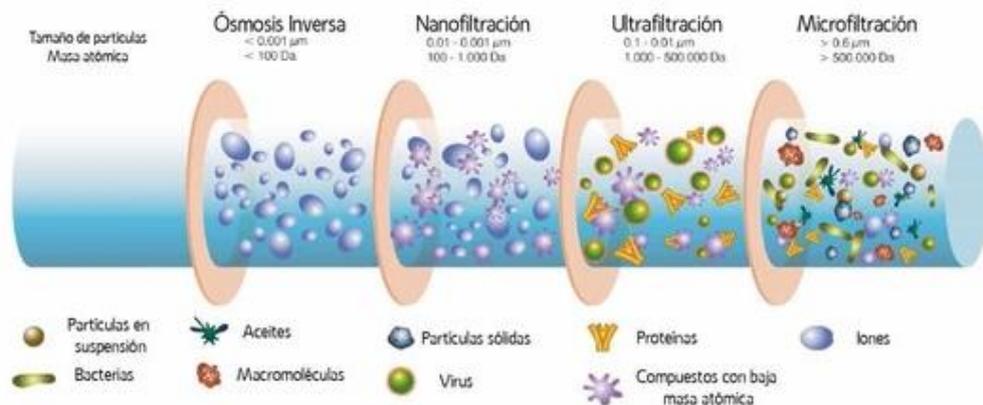


Figura 1.3 Resumen de diferentes tipos de membranas para tratamiento de aguas (Bluegold 2020)

En las investigaciones realizadas por Kowalska (2008) observaron que con membranas de polisulfona y la polietersulfona daban buenos resultados en la separación de tensoactivos aniónicos, permitiendo alcanzar un menor concentración que va del 71 al 91% y del 55 al 81% para 5 kDa y 10 kDa respectivamente. La eliminación de tensoactivos por membranas de nanofiltración resulta con menos problemas de permeabilidad y ensuciamiento. El tratamiento con filtración puede dar resultados satisfactorios en la remoción de tensoactivos, requiere menos espacios que otros tratamientos convencionales. Sin embargo, existen desventajas como el ensuciamiento de las membranas, que en algunos casos tienen que ser sustituidas con regularidad debido a que el ensuciamiento es difícil de eliminar lo que puede suponer problemas en el proceso y representar más costos.

1.4.3.2 Coagulación y floculación

La coagulación-floculación se utiliza para mejorar la capacidad de un proceso de tratamiento para eliminar partículas. En la coagulación se forma una masa lo suficientemente grande como para sedimentar o quedar atrapada en el filtro. Por otro lado, la floculación es una agitación suave para fomentar que las partículas formadas se agrupen en masas lo suficientemente grandes como para asentarse o ser filtradas desde la solución (Krishnan et al. 2016).

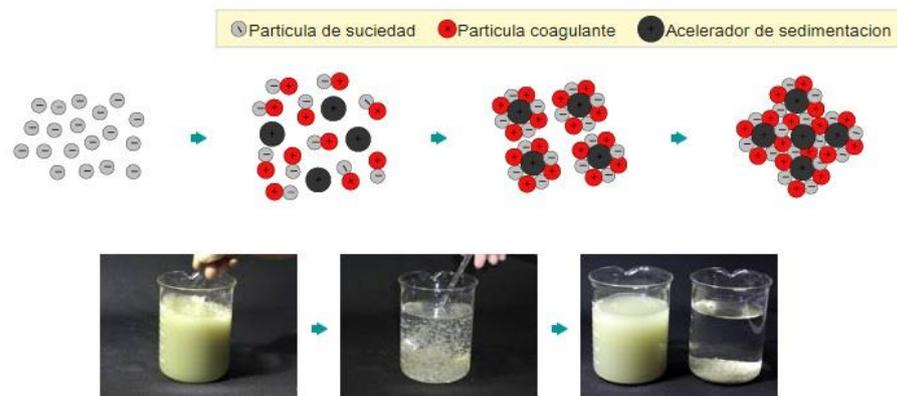


Figura 1.4 Mecanismo de Coagulación-Floculación

Este método ha demostrado ser eficaz para la eliminación de tensoactivos en aguas residuales con un aproximado del 95 % y la reducción del DQO de aproximadamente 88 %. La coagulación-floculación proporciona un tratamiento razonable y utiliza productos químicos de relativamente bajo coste, no obstante, el método no es rentable para este caso ya que requiere personal cualificado para la construcción de cámaras y la dosificación de productos químicos incluyendo el mantenimiento de sistema. Otra de las principales desventajas que se presenta es que los compuestos tóxicos al no ser degradados son transferidos a la fase sólida cuando se forman los lodos.

1.4.3.3 Adsorción

La adsorción de algunos tensoactivos catiónicos ha sido estudiada con diversos adsorbentes como por ejemplo: sílice y cuarzo, zeolita y clinoptilolita, rutilo, y carbón activado (Krishnan et al. 2016). La mayoría de las investigaciones concluyen que es un mecanismo de adsorción simple y es eficaz cuando se utilizan poros pequeños. El carbón activado es un adsorbente muy estudiado para la remoción de tensoactivos (Palmer and Hatley 2018). Los filtros de carbón activado son fáciles de instalar, pero también se debe considerar su consumo de energía y mano de obra especializada que puede presentar costes elevados debido a la sustitución periódica del material adsorbente.

1.4.3.4 Oxidación Avanzada

Otros métodos para eliminar tensoactivos son los Procesos de oxidación Avanzada (POA) estos implican la adición o creación de una especie altamente oxidante para degradar materia orgánica (Bes Monge, Silva, and Bengoa 2016). Los POA utilizan oxidantes de alta energía como el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), reactivos de Fenton (H_2O_2/Fe^{2+}), para producir intermediarios reactivos los cuales son conocidos como radicales hidroxilos (HO^*). El radical hidroxilo en este proceso extrae un átomo de hidrógeno de un compuesto orgánico (R-H), posteriormente genera un radical orgánico ($*R$) que luego sufre una serie de transformaciones químicas para formar varios productos de oxidación y subproductos.

Los POA puede utilizar una mezcla de estos oxidantes, así como también la irradiación ultravioleta (UV) a los cuales se los conoce como procesos fotoquímicos. La radiación UV actúa como fuente de energía para activar y potenciar la producción de radicales hidroxilos. En la Tabla 1.3 se resumen las diferentes tecnologías POA clasificadas en proceso fotoquímicos y no fotoquímicos.

Tabla 1.4 Procesos de oxidación avanzada más utilizados (Bes Monge et al. 2016)

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Ozonización en medio alcalino (O_3/ HO^\bullet)	Ultravioleta de vacío (UV-V)
Ozonización con peróxido de hidrogeno (O_3/H_2O_2)	UV/ H_2O_2 UV/ O_3
Procesos Fenton (Fe_2^+/H_2O_2) y relacionados	UV/ O_3/H_2O_2 Foto-Fenton y relacionados
Oxidación Electroquímica	Fotocatálisis heterogénea con TiO_2
Plasma no térmico	
Descarga electrohidráulica- Ultrasonido	
Oxidación en agua subcrítica y supercrítica	
Aceleradores de electrones	

1.4.4 Fundamento teórico de la tecnología seleccionada

Los métodos convencionales suelen presentar dificultades en el tratamiento de tensoactivos, como largos tiempos de tratamiento, necesidad de personal especializado, instalaciones con mayor capacidad, etc. Dado la necesidad de remover elevadas cantidades de tensoactivos se seleccionan los POA, pues permiten incrementar la biodegradabilidad de aguas residuales y no son de difícil implementación (Sebastián & Muñoz, n.d.). Se pueden dar mediante procesos Fenton, luz UV/ O_3 , luz UV/ TiO_2 , luz UV/ H_2O_2 .

1.4.4.1 Proceso Fenton

El proceso Fenton se caracteriza por la generación de radicales HO^\bullet mediante la descomposición del peróxido de Hidrógeno (H_2O_2) al reaccionar con iones ferrosos en un medio ácido (pH aproximado recomendado 3 para evitar la precipitación del hierro en oxhidrilos). Estos radicales HO^\bullet atacan a la materia orgánica a una alta velocidad de reacción (Mirbahoush, Chaibakhsh, and Moradi-Shoeili 2019).

A pesar de la efectividad del método se han planteado preocupaciones con respecto a la turbidez y la eliminación del hierro disuelto cuando se

finaliza el proceso, pues es necesario la coagulación para su separación. Así también, debido a la reducción excesiva en el pH del medio de reacción es necesario el control periódico del mismo, pues es una variable que solo puede determinarse experimentalmente, lo que dificulta la aplicación del método en una industria. Los inconvenientes adicionales de la oxidación de Fenton incluyen un alto consumo de productos químicos, inestabilidad del reactivo de Fenton, reacciones parasitarias y pérdida de oxidante, dificultad para optimizar las concentraciones de los reactivos y la necesidad de neutralizar las aguas residuales tratadas antes de su eliminación (Ziembowicz and Kida 2022).

1.4.4.2 Luz UV/O₃

El ozono por sí solo no provoca la oxidación completa de algunos compuestos orgánicos refractarios debido a que tiene una velocidad de reacción baja, por ello se combina con luz UV para potenciar la producción de radicales hidroxilos que aumenta la eficacia del tratamiento. El sistema UV/O₃ es un sistema catalítico considerado eficiente para la degradación de contaminantes refractarios en aguas residuales. El proceso comienza por la fotólisis del ozono y es seguido de la producción de radicales HO[•] dado por la reacción del O₂ con agua. Para este sistema es importante considerar algunos factores clave que afectan a la operación: el modo de distribución de O₂, el control de la presión relativa dentro del reactor, la proporción de adición de ozono y la intensidad de la radiación UV. Otro punto para considerar se relaciona a la transferencia de masa de ozono, la cual está influenciada por muchos factores, que se pueden dividir en efectos hidrodinámicos y fisicoquímicos.

El ozono en sí mismo es inestable y puede descomponerse rápidamente en oxígeno molecular, lo que lleva a una baja tasa de utilización (Rekhate and Srivastava 2020). Según Krishnan et al., (2016) el tratamiento de tensoactivos con el ozono parece ser difícil de implementarlo a gran

escala puesto que es más eficiente con caudales bajos. Además, es necesario un tratamiento de los gases de escape con ozono, lo que incrementa también costos de operación.

1.4.4.3 Luz UV/TiO₂

El Dióxido de Titanio (TiO₂) posee propiedades peculiares económicas y medioambientales, por lo cual se emplea en gran medida como fotocatalizador en los procesos de oxidación avanzada heterogéneos para el tratamiento de aguas residuales. El TiO₂ induce la degradación foto-oxidativa de compuestos orgánicos, como colorantes, adsorbido en su superficie en medios acuosos a través de reacciones de radicales (Germani et al. 2021).

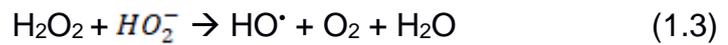
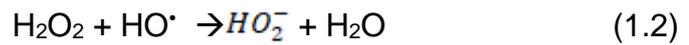
1.4.4.4 Luz UV/H₂O₂

El mecanismo UV/H₂O₂ implica la formación de radicales HO^{*} por fotólisis del H₂O₂ ofreciendo ventajas notables, ya que el oxidante es comercialmente accesible, térmicamente estable, presenta una solubilidad infinita con el agua y la operación no es compleja (Moncada Fuentes and Cubillos Alarcón 2006).

Además, la luz UV puede funcionar como desinfectante ya que según Spellman (2009), la radiación ultravioleta en longitudes de onda de entre 220 y 320 nm pueden penetrar las paredes celulares de lo microorganismo e interferir con su material genético

Los factores principales que afectan el proceso son la concentración inicial del compuesto objetivo, concentración de peróxido de hidrógeno, pH del agua residual y tiempo de reacción. Se debe considerar que el exceso de peróxido de hidrógeno ocasiona reacciones competitivas produciendo un efecto inhibitorio para la degradación, por lo que debe determinarse la cantidad necesaria para el caso de estudio.

El mecanismo del proceso se presenta en las ecuaciones 1.1 a 1.4, donde el principal enfoque es la ruptura del enlace entre oxígenos O-O dado por la radiación UV, permitiendo la formación de dos radicales de hidroxilo (véase ec. 1.1)



CAPÍTULO 2

2. Metodología

2.1 Población y muestra

El presente proyecto se desarrolló en Guayaquil, Guayas, Ecuador. El estudio se concentró en la ETAPA IV del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto, específicamente en la salida del Filtro Facultativo que se describe en el Capítulo 1 sección 1.4.1. Esto, debido a que es donde se presenta la acumulación de espuma por la alta concentración de tensoactivos (Figura 2.1 b). Las muestras de agua fueron de tipo simple, y fueron colectadas del efluente de Filtro Facultativo ubicado antes de la cámara de recolección para la etapa de cloración como se muestra en la Figura 2.1 a.



(a)

(b)

Figura 2.1 (a) Salida del efluente del Filtro Facultativo de la PTAR. (b) Foto del problema del espuma en la cámara de recibimiento.

2.2 Muestreos en la Planta de Tratamientos de Agua Residual

Se siguió la norma técnica INEN 2169-2176: 2013 “AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO”. En la Figura 2.2 se describe el procedimiento realizado para la toma de muestras de aguas residuales en la PTAR estudiada. Los muestreos se realizaron en diferentes días de la semana, debido a que el caudal y los componentes del efluente pueden variar dependiendo de las actividades y rutinas de los habitantes de la urbanización. En la Tabla 2.1 se detalla las tomas de muestras realizadas a lo largo del proyecto.

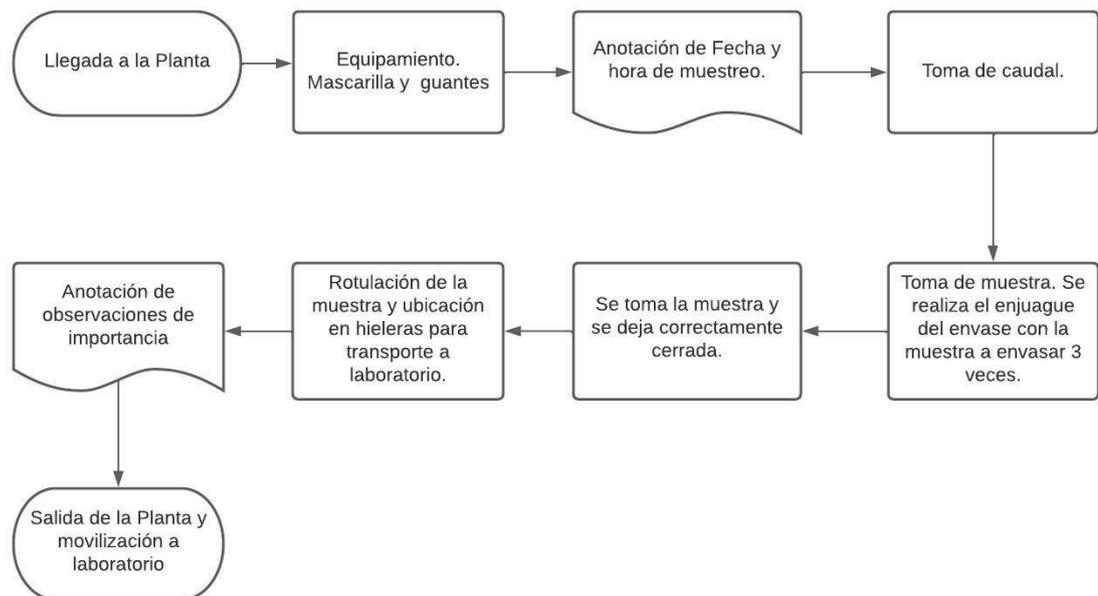


Figura 2.2 Procedimiento para la toma de muestras en la PTAR

Tabla 2.1 Muestreos realizados en la PTAR

Muestra	Fecha de Muestreo	Tipo de contenedor	Punto de muestro	Volumen de muestra	Método de preservación
1	24-jun-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	12 L	Refrigeración (6°C)
			Afluente de la PTAR	250 mL	
			Efluente de la PTAR	250 mL	
2	2-jul-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	12 L	Refrigeración (6°C)

			Afluente de la PTAR	250 mL	
			Efluente de la PTAR	250 mL	
3	6-jul-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	12 L	Refrigeración (6°C)
			Afluente de la PTAR	250 mL	
			Efluente de la PTAR	250 mL	
4	13-jul-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	12 L	Refrigeración (6°C)
			Afluente de la PTAR	250 mL	
			Efluente de la PTAR	250 mL	
5	29-jul-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	24 L	Refrigeración (6°C)
6	10-ago-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	24 L	Refrigeración (6°C)
			Fondo de la cámara de pre-cloración	250 mL	
7	17-ago-2022	Plástico	Efluente del Filtro facultativo	24 L	Refrigeración (6°C)

2.3 Evaluación del estado de remoción de materia orgánica del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto.

Para la toma de caudal de la planta de tratamientos de agua residual se procedió a tomar mediciones en la salida del Filtro Facultativo, mismo punto donde se realizaba la toma de muestra (Figura 2.1). Se usó un balde graduado de 10 litros y un cronómetro para tomar el tiempo en el que el balde se tardaba en llenar dicho volumen, este procedimiento fue repetido tres veces para obtener un tiempo promedio. El caudal fue calculado mediante la Ecuación 3.1, donde Q es el Caudal en litros por segundo (l/s), V es el volumen en litros (l) y t es el tiempo en segundos (s).

$$Q = V/t \quad (3.1)$$

Por otro lado, se evaluó el efluente final de la PTAR de la urbanización mediante análisis físicos, químicos y biológicos realizados por un laboratorio externo durante el mes de diciembre del 2021 y los dos primeros meses del 2022 (Anexos). A partir de los informes, se determinó la cantidad de Carbono, Nitrógeno y Fosforo y se comparó con la relación ideal para procesos biológicos anaeróbicos que describe en el Capítulo 1 en la sección 1.4.2.1.

Adicionalmente, se realizó una observación microbiológica de los organismos presentes en una muestra de agua obtenida del sector después del vertedero, es decir, el agua que sale de la cámara de recibimiento del Filtro Facultativo que es en donde se ha enfocado la propuesta para remoción de contaminantes. Se tomó una pequeña cantidad de la muestra con una pipeta, se colocó en una placa portaobjetos y encima un cubreobjetos para posteriormente ubicarlo en un microscopio Olympus CX31 conectado a la aplicación NIS ELEMENTS en computadora.

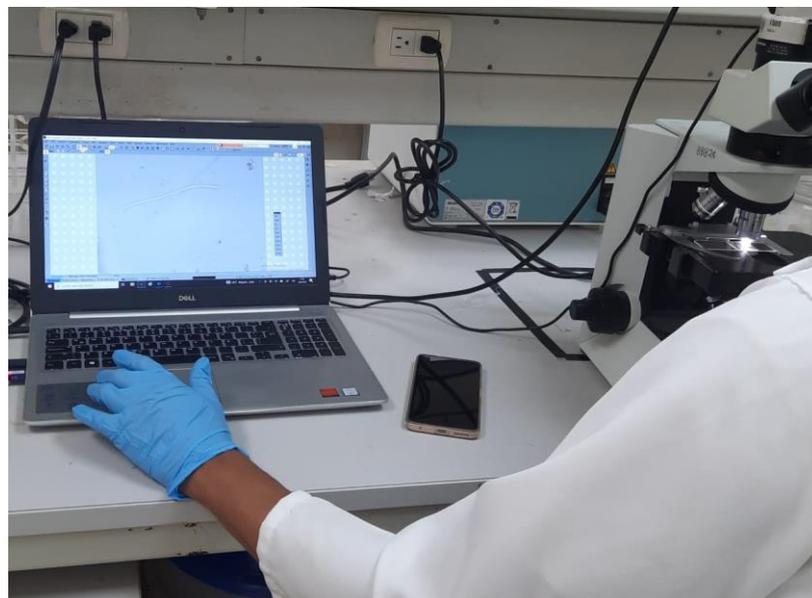


Figura 2.3 Observación microbiológica en muestra de agua

2.4 Construcción del sistema UV/H₂O₂ a escala laboratorio

El presente proyecto se realizó mediante el diseño experimental, el cual fue desarrollado a escala de laboratorio. Se realizaron experimentos en modalidad Batch y Continuo. El primero para determinar la efectividad del sistema UV/H₂O₂ en la remoción de tensoactivos y patógenos presentes. La segunda modalidad se realizó con el fin de trabajar con un sistema proporcional al caudal de la PTAR y así poder simular un sistema que se acople con el funcionamiento actual de la misma. Sin embargo, es importante mencionar que el sistema Batch permitió encontrar datos e información para desarrollar el sistema Continuo por lo que el diseño experimental se basa en gran medida en la primera modalidad estudiada.

2.4.1 Sistema Batch UV/H₂O₂

Considerando la revisión previa de estudios con UV/H₂O₂ se realizó el sistema de oxidación avanzada tomando en cuenta el diseño de Moncada Fuentes and Cubillos Alarcón (2006), en donde se evalúa a escala de laboratorio un sistema Batch de remoción fotoquímica de tensoactivos con la finalidad de aplicarlo en agua residuales de industrias textiles. En la Figura 2.3 a, se muestra un esquema del sistema de tratamiento de agua residual a escala laboratorio elegido de tal forma que el sistema sea el viable y eficiente para el desarrollo de proyecto.

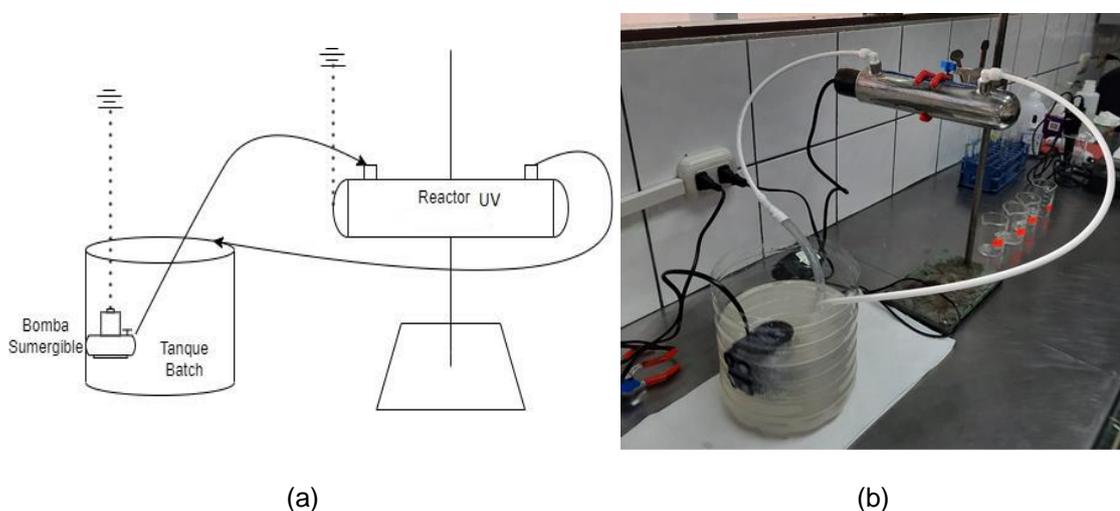


Figura 2.4 Sistema Batch UV/H₂O₂. (a) Esquema del sistema escala de laboratorio. (b) Foto del montaje final del sistema.

El sistema UV/H₂O₂ consta de un tanque de mezclado, una bomba sumergible y un reactor fotoquímico. Para el tanque de mezclado se eligió un recipiente de plástico debido a su economía, resistencias química y térmica, y facilidad de transporte. La bomba de tipo sumergible tiene una potencia de 8 W y un caudal máximo de 0.0833 L/s, las especificaciones técnicas de la bomba y características del tanque de mezclado se detallan en la Tabla 2.3. El sistema funciona de tal manera que la muestra contenida en el tanque combinada con una dosis de H₂O₂ previamente elegida es impulsada por la bomba sumergible para que se dirija al reactor de luz UV, y esta es recirculada al tanque siguiendo un proceso tipo Batch durante un tiempo de exposición elegido.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas la Bomba Sumergible y Tanque Batch empleados

Bomba Sumergible		Tanque Batch	
Parámetro	Especificación	Parámetro	Especificación
Marca	JAD	Diámetro	16.5 cm
Tipo de bomba	Sumergible	Altura	18.2 cm
Aplicación original	Bomba para peceras	Material	Plástico
Potencia	8 W	Capacidad	3 l
Voltaje	230/115 V	Forma	Cilindro
Caudal máximo	300 l/h		
Altura máxima	0.5 m		

2.4.2 Reactor UV

El reactor fotoquímico consiste en una cámara cilíndrica, cerrada por los extremos por lo que cuenta con una entrada y una salida para el agua. Adicional posee un vidrio de cuarzo que atraviesa el eje central con el fin de aislar la lámpara UV con el agua a pasa a través del cilindro. La lámpara UV elegida es una lámpara de vapor de mercurio de tipo germicida con una radiación de 254 nm de 6 watts, posee un balastro para conectarla a una fuente eléctrica. Este reactor es el mismo que es utilizado para la desinfección de agua por radiación ultravioleta. Se presenta la Tabla 2.5 con las características y especificaciones técnicas de los componentes del reactor fotoquímico elegido.

Tabla 2.3 Características y especificaciones técnicas del reactor fotoquímico

Componente	Variable	Valor	Unidad
Lámpara UV	Longitud	21.6	cm
	Diámetro	1.7	cm
	Voltaje	100-120	V
	Base	4	Clavijas
	Potencia	6	W
	Vida útil	9000	horas
Coraza de lámpara	Largo	24.4	cm
	Diámetro	1.7	cm
	Material	Cuarzo	-
Cámara	Longitud	23.6	cm
	Diámetro	5.1	cm
	Material	Stainless Steel	-
	Capacidad	1	GPM
Entrada y salida	Diámetro	¼	in
Accesorios	Acoples de plástico, mangueras de ½ in, cinta teflón, soporte universal, silicón frío.		

La dosis de luz ultravioleta se calculó para los tiempos de exposición de 15, 30, 60 y 120 minutos según la Ecuación 3.2.

$$D = I \times t \quad (3.2)$$

Donde D es la dosis UV (mWs/cm²), I es la intensidad de la luz UV (mW/cm²) y t es el tiempo de residencia o de exposición (s). Se detallan las dosis UV para los tiempos de residencia elegidos en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4 Dosis UV para cada tiempo de residencia

Tiempo de residencia (s)	Área de exposición (cm²)	Intensidad (mW/cm²)	Dosis UV (mWs/cm²)
900	176.31	34.03	30628.53
1800	176.31	34.03	61257.07
3600	176.31	34.03	122514.14
7200	176.31	34.03	245028.28

2.4.3 Sistema Continuo UV/H₂O₂

En busca de simular un sistema que se acople al funcionamiento de la PTAR estudiada se bosquejó un sistema continuo a escala laboratorio (Figura 2.6 a). El sistema cuenta con un tanque homogeneizador de 18 litros, una bomba sumergible, una luz UV con coraza de cuarzo, un recipiente de 7 litros que simula una cámara de recepción de plástico la cual incluye divisiones para conseguir mayor tiempo de retención del agua, una cámara de irradiación de la luz UV que permite evitar el contacto humano con las ondas UV y aprovecharlas mejor en el tratamiento del agua y finalmente un recipiente que recolecta el agua tratada. Cabe recalcar que la bomba sumergible es la misma que usó en el sistema Batch por lo que sus especificaciones se encuentran en la Tabla 2.3, así mismo la lámpara utilizada es la misma del reactor UV, pero sin la cámara de acero, solo la coraza de cuarzo es utilizada para proteger la lámpara UV del agua. El sistema continuo armado en el laboratorio se muestra en la Figura 2.7 b.

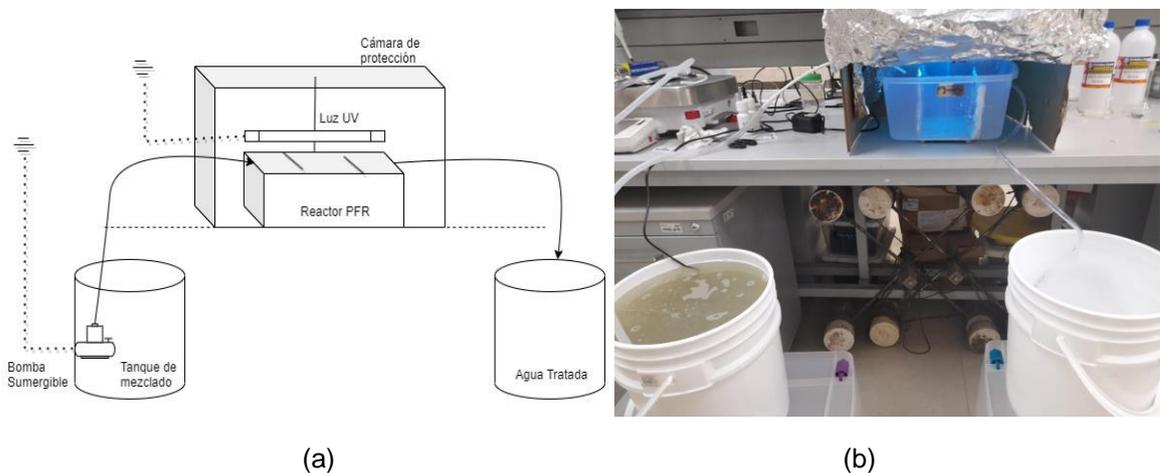


Figura 2.5 Sistema continuo UV/H₂O₂. (a) Esquema del sistema escala de laboratorio. (b) Foto del montaje final del sistema

2.5 Diseño y desarrollo de experimentos

Para la investigación y desarrollo del presente trabajo fueron necesarios diferentes materiales y equipos que fueron usados durante la experimentación en el laboratorio, en la Tabla 2.2 se detallan los elementos empleados.

Tabla 2.5 Materiales y equipos utilizados durante el trabajo de campo y laboratorio

Trabajo en campo		Trabajo en Laboratorio	
Materiales	Materiales	Reactivos	Equipos
Guantes de nitrilo	Mandil	Peróxido de Hidrogeno	pHmetro Marca HACH
Mascarilla	Guantes de nitrilo	30% w/w Marca	Multiparámetro Marca
Envases de	Probetas	Scharlau.	HACH
plástico de 2L	Micropipetas	Cloro	Reactor UV
Envases de	Puntas de	comercialSolución	Turbidímetro Marca
plástico de 250	micropipetas	tampón de agua de	HACH TL2350
mL	esterilizadas	lavado para	Balanza analítica
Cooler	Vasos de	detergentes.	Espectrofotómetro Marca
Hielo	precipitación	Reactivo de	HACH DR5000
	Matraz Kitasato	detergente	Bomba sumergible Marca
	Piseta	Agua destilada.	JAD
	Tubos de ensayo	Oxisulfato de Titanio	Microscopio OLYMPUS
	Gradilla	(IV)- solución de ácido	CX31
	Gotero de vidrio	sulfúrico.	Incubadora
	Filtro	Agua ultrapura o Tipo I	Autoclave
	Pinzas	Agar MacConkey	
	Soporte universal	Solución Salina 0.9%	
	Mangueras		
	Celdas de vidrio de		
	10 mL		
	Celdas de plástico		
	Placa Petri		
	Asa de siembra de		
	vidrio		

2.5.1 Método de análisis de tensoactivos

Se trabajó la fotocatalisis homogénea UV/H₂O₂ para conseguir la remoción de las altas concentraciones de tensoactivos encontradas en el agua residual doméstica. El método empleado para la medición de tensoactivos fue el de Sustancias Activas de Azul de Metileno (SAAM). El método SAAM mide agentes de superficie y sustancias que actúan con el azul de metileno como el caso de los tensoactivos, el cual comprende tres extracciones sucesivas desde un medio acuoso ácido con exceso de azul de metileno a una fase orgánica de cloroformo, seguida de la lectura del color azul de dicha fase orgánica. La lectura de color se realizó mediante disco de color, que es una prueba visual que permite leer la concentración en el punto donde se produce el equilibrio colorimétrico, como se muestra en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Test visual. Disco de color para determinación aproximada de concentración de tensoactivo

Tabla 2.6 Corridas analíticas realizadas del sistema UV/H₂O₂

Experimentaciones	Flujo (l/s)	Veces realizadas	Cantidad de análisis de Tensoactivos realizados en cada minuto. (por alícuotas tomadas)				
			15	30	60	90	120
Sistema Batch							
Corrida analítica con 100 ppm de H₂O₂	0.0006944	2	2	2	2	2	2
Corrida analítica con 250 ppm de H₂O₂	0.0006944	4	4	4	4	4	4
Corrida analítica con 500 ppm de H₂O₂	0.0006944	2	2	2	2	2	2
Sistema continuo							
Corrida analítica con 18300 ppm H₂O₂	0.0145	1			1		
Corrida analítica con 250 ppm H₂O₂	0.0006944	1			0		

2.5.2 Método de análisis de peróxido de hidrógeno

Con el fin de conocer el peróxido de hidrógeno residual en el agua una vez finalizada la reacción, se realizó un análisis colorimétrico. Primero se tomó una alícuota de 1ml del agua tratada, se colocó en una celda de 10mm junto con 1 ml del reactivo Oxisulfato de Titanio (IV) – solución de ácido sulfúrico. Se preparó el blanco al mismo tiempo con 1 ml de agua destilada y 1 ml de reactivo, dejándolos reaccionar por 10 minutos. A continuación, se colocó el blanco y presionó “cero” en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 405 nm. Finalmente, se colocaron las muestras en el espectrofotómetro a la misma longitud de onda y presionó “leer”, apareciendo en la pantalla el respectivo valor de absorbancia.

Para conocer la concentración en mg/l del peróxido de hidrógeno es necesaria una curva de calibración. Para ello, se preparó una solución madre de 1 g/l y a partir de esta se prepararon disoluciones de 1 mg/l, 5 mg/l, 15 mg/l, 30 mg/l, 50 mg/l, 75 mg/l y 100 mg/l. A cada disolución se le determinó la absorbancia

siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Se bosquejó una gráfica de absorbancia versus concentración y posteriormente se obtuvo la tendencia de la gráfica con la ecuación de la recta a la que se ajusta (Apéndice C).

2.5.3 Experimentos de control

Se realizó un experimento de control con el fin de evidenciar cómo actúa el peróxido de hidrógeno y la luz UV como sistemas separados en la muestra de agua. El primer control se realizó con la concentración de H_2O_2 que se consideró apropiada para el sistema UV/ H_2O_2 . Primero se agregó el peróxido de hidrógeno a la muestra, posteriormente se mantuvo en constante agitación durante dos horas y se tomaron alícuotas en 15, 30, 60 y 90 minutos para sus análisis. Con respecto al control de luz UV, la muestra de agua fue expuesta a la luz durante dos horas y se realizó la toma de alícuotas y análisis al igual que el control con H_2O_2 .

2.5.4 Experimentos con el sistema batch UV/ H_2O_2 para remoción de tensoactivo del efluente de agua residual doméstica

Se empezó variando las concentraciones de peróxido de hidrógeno para encontrar la más apropiada a utilizar para la muestra analizada, partiendo de concentraciones de 100, 250 y finalmente 500 ppm, para cada una se obtuvo el volumen adecuado que se añadirían a 2.5 litros de muestra. Es de recalcar, que el peróxido de hidrógeno empleado se consiguió comercialmente al 30%. Se definió el tiempo de reacción entre 0 y 120 minutos que en base a estudios realizados en artículos revisados (Cubillos, Moncada. 2006), señalan ser un tiempo promedio para la obtención de resultados significativos en la disminución de los tensoactivos.

Se tomaron alícuotas a los 15, 30, 60, 90 y 120 minutos para el análisis de temperatura, pH, turbiedad, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Disueltos Totales (SDT), tensoactivos, salinidad, conductividad y peróxido de hidrogeno residual en cada una de sus tomas. Es importante señalar que se

realizó la toma inicial de todos los parámetros a analizar para el seguimiento del cambio de estos a través del tiempo que la muestra fue expuesta en el reactor.

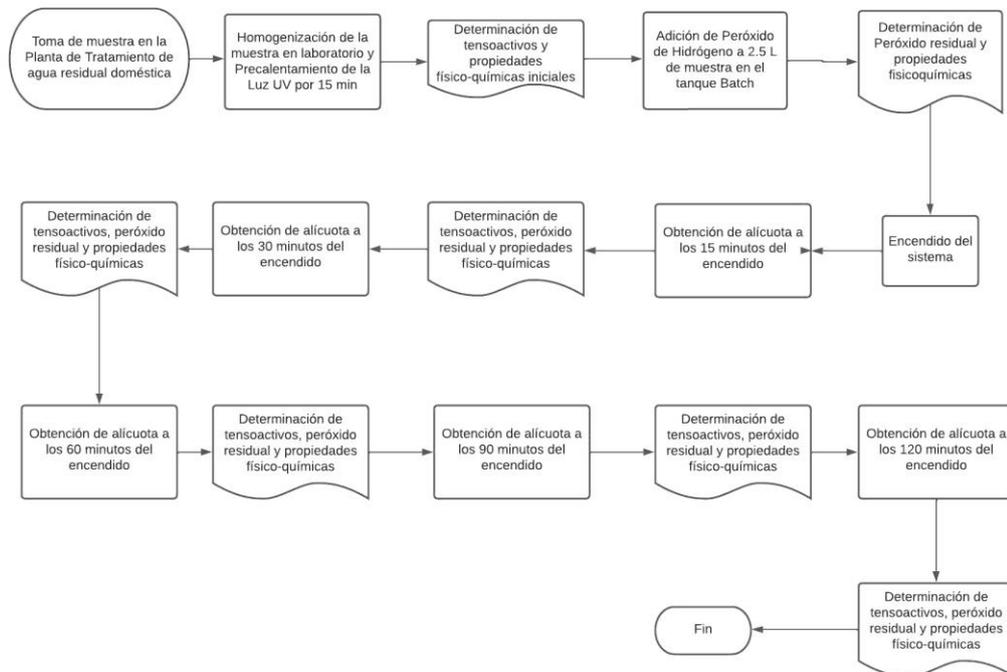


Figura 2.7 Procedimiento para la experimentación del sistema UV/H₂O₂

Se realizó la experimentación hasta 120 minutos en las concentraciones de H₂O₂ de 50, 100 y 250 ppm a pesar de cumplir la norma de valores permisibles de descarga antes del tiempo máximo, para conocer el comportamiento de remoción de tensoactivo y mejora de otros parámetros como el Coliformes totales. Sin embargo, si el valor disminuía considerablemente (menor a 0) antes de los 120 minutos se finalizaba la experimentación, como sucedió con la concentración de 500ppm.

2.5.5 Experimentos con el sistema continuo UV/H₂O₂ para remoción de tensoactivo del efluente de agua residual doméstica

Se realizó la experimentación con sistema de flujo continuo empleando una concentración de peróxido de hidrógeno dada por la tendencia de los datos

obtenidos por el sistema Batch con la concentración en 250 ppm. Se corrió analíticamente el sistema cuatro veces para simular la presencia de cuatro estancias con luces ultravioletas.

2.5.6 Variables que afectan la remoción de tensoactivos del sistema.

La remoción de tensoactivos mediante el método empleado (oxidación avanzada) se ven afectadas por algunas variables como: concentración inicial del tensoactivo, volumen del peróxido, tiempo de contacto entre las sustancias que reaccionan, turbiedad y composición de la muestra. La concentración inicial de tensoactivos influye en el tiempo, volumen y concentración requerida de oxidante. El volumen de peróxido es la principal fuente de radical OH, el cual es agente oxidante para la remoción del tensoactivo. El tiempo de contacto adecuado entre el tensoactivo, H₂O₂, sustancias presentes y luz ultravioleta permiten llegar a la norma establecida para tensoactivos y funciona además como germicida. La turbiedad es inhibidora en la reacción de disociación del peróxido, puesto que los sólidos en suspensión obstruyen la radiación de la luz UV. Finalmente, la composición de la muestra influye también en la dosis requerida de H₂O₂ pues se pueden producir otras reacciones que consuman el radical OH producido disminuyendo la efectividad en la oxidación del tensoactivo.

En la tabla 2.6 se presentan las variables identificadas como modificadas (independientes) para conocer el comportamiento de las variables dependientes.

Tabla 2.7 Identificación de Variables dependientes e independientes del sistema

Variables Independientes	Variables dependientes
Concentración de Peróxido de Hidrógeno	Temperatura
Tiempo de Residencia	pH
Incidencia de luz UV	Turbiedad
	Sólidos suspendidos disueltos (SSD)
	Sólidos suspendidos totales (SST)

Tensoactivos
Salinidad
Conductividad
Peróxido Residual

2.6 Procedimiento para la identificación de colonias de coliformes presentes en el agua residual doméstica de la PTAR.

2.6.1 Preparación del medio de cultivo MacConkey

Se preparó los medios de cultivo con 250 ml de agua filtrada y 50 g de agar, posteriormente se encendió la autoclave y se definió una temperatura de 121°C para esterilizar el medio durante 15 minutos aproximadamente. Se retiró el medio de la autoclave y se dejó enfriar al ambiente para que fueran llevados a la cabina de flujo laminar (previamente desinfectada con alcohol). Finalmente, se colocó el medio de cultivo en las placas Petri y se preservó en el refrigerador.

2.6.2 Inoculación de las muestras de agua en placas de cultivo MacConkey

Se tomó una muestra de agua sin tratar por el sistema fotoquímico, otra muestra de agua tratada empleando sistema Batch y una tercera muestra tratada con sistema Continuo. Estas alícuotas fueron diluidas en solución salina al 0.9% en relaciones de 1:10, 1:10², 1:10³ para las muestras tratadas y hasta 1:10⁵ para la muestra sin tratar. Posteriormente, se tomaron alícuotas de 0.1 ml y fueron colocadas en distintas placas Petri rotuladas correctamente que contenían el medio de cultivo. Se realizó una dispersión con el asa de siembra de vidrio y se colocaron en la incubadora a 37°C. Finalmente, se realizó la lectura de las placas después de 24 horas.

CAPÍTULO 3

3. Resultados Y Análisis

3.1 Resultados y análisis de la remoción de materia orgánica del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto

A partir de las mediciones de caudal en el efluente del filtro facultativo se elaboró el Gráfico 3.1. Los valores de caudales a pesar de haber sido obtenidos durante los meses de junio a agosto tuvieron varias fluctuaciones debido a que durante ese periodo el caudal fue modificado con el fin de mejorar el rendimiento de la Planta. El valor más alto obtenido fue de 1.072 l/s, según la memoria técnica de la PTAR el caudal promedio de diseño es de 4.97 l/s por lo que la planta se encuentra operando con un caudal por debajo de su diseño.

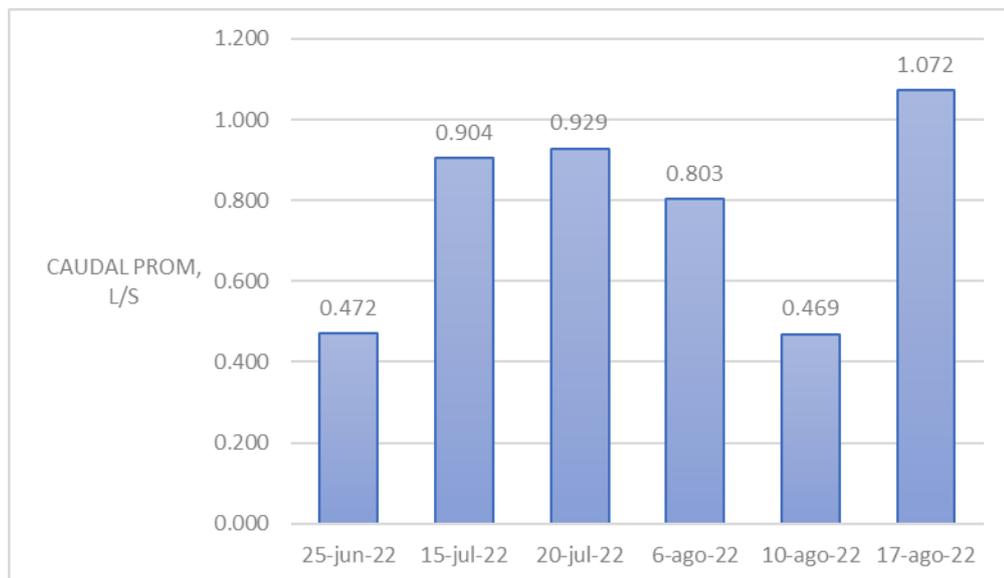


Figura 3.1 Caudales medidos del efluente del Filtro Facultativo

Por otro lado, se analizó también la cantidad de nutrientes presentes en el agua tratada (carbono, nitrógeno y fósforo) en base a resultados de análisis de un laboratorio certificado de los meses diciembre 2021, enero y febrero 2022 (Apéndice A).

Tabla 3.1 Análisis de laboratorio certificado

	C	N	P
Diciembre 2021	33	44.1	4.2
Enero 2022	60	36.9	5.9
Febrero 2022	60	29.6	3.6

Los ratios entre los nutrientes que se tienen con los valores indicados en la tabla 3.1 son 8:11:1, 10:6:1, 16:8:1 respectivamente, valores lejanos de los sugeridos como ideales 250:5:1 hasta 500:5:1, como lo descrito en la sección 1.4.2.1. Por lo cual, puede existir un desbalance de la comunidad microbiana necesaria para el tratamiento del agua residual. Por ejemplo, acelerada eutrofización que ocasiona decaimiento en la concentración de oxígeno disuelto y no permite la correcta degradación de materia orgánica en el agua (Molina et al. 2010).

Asimismo, el crecimiento de bacterias nitrificantes en exceso puede generar impactos dañinos en comunidades biológicas y a la salud humana, siendo trascendental la disminución o eliminación de nitrógeno total. Es importante considerar el pH, la temperatura y la salinidad para conseguir condiciones favorables en la reducción del nitrógeno (Artículo et al., 2013).

Mediante un análisis microbiológico y siguiendo la metodología indicada en el capítulo 2, sección 2.3 se evidenció la abundante presencia de bacterias filamentosas y materia orgánica en el agua muestreada en la salida del vertedero. Se presenta las imágenes obtenidas de la observación en microscopio en la Figura 3.2.

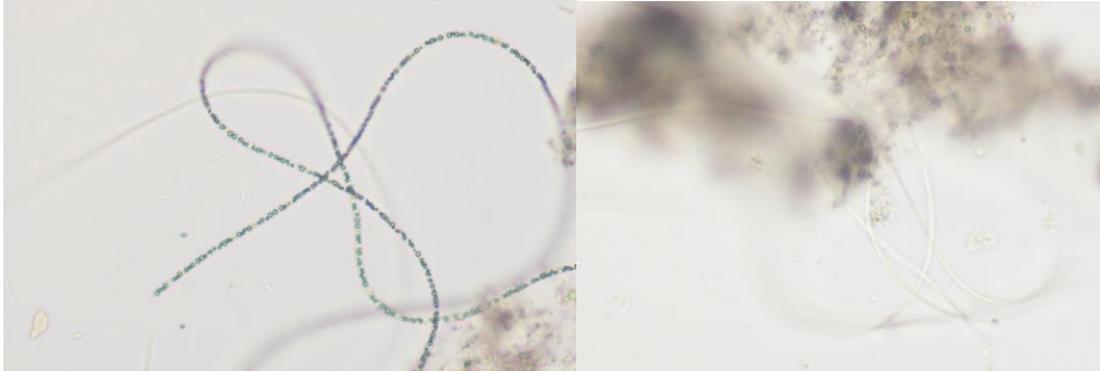


Figura 3.2 Bacterias filamentosas encontrados en muestra de agua obtenida de la salida del filtro facultativo de la PTAR

La presencia de filamentosos puede ocasionar problemas en el tratamiento del agua residual como son el foaming (formación de espuma) y el bulking. Este último hace referencia a la mala sedimentación, la aparición de abundantes organismos filamentosos en el agua residual evita que los flóculos biológicos del reactor se puedan sedimentar correctamente, pues ocasionan que éstos sean voluminosos y pocos consistentes (Metcalf and Eddy, 2003). Esta puede ser una causa adicional por la cual se tiene bastante formación de espuma, altos valores de turbiedad (Figura 3.8) y sólidos suspendidos en la última Etapa del tratamiento e indicador de que los reactores requieren mayor atención tanto en sus condiciones y parámetros utilizados como en el mantenimiento de estos.

3.2 Resultados y análisis de los experimentos del sistema Batch UV/H₂O₂ a escala de laboratorio a diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno.

El sistema Batch UV/H₂O₂ se llevó a cabo con concentraciones de H₂O₂ de 100, 250 y 500 ppm en diferentes tiempos de contacto (15, 30, 60 y 120 minutos). Para el análisis del sistema se obtuvo el porcentaje de remoción para cada caso estudiado con las diferentes concentraciones de H₂O₂. La remoción se determinó como la concentración de tensoactivos en un tiempo de contacto específico con respecto a la concentración inicial de tensoactivos presente en la muestra de agua.

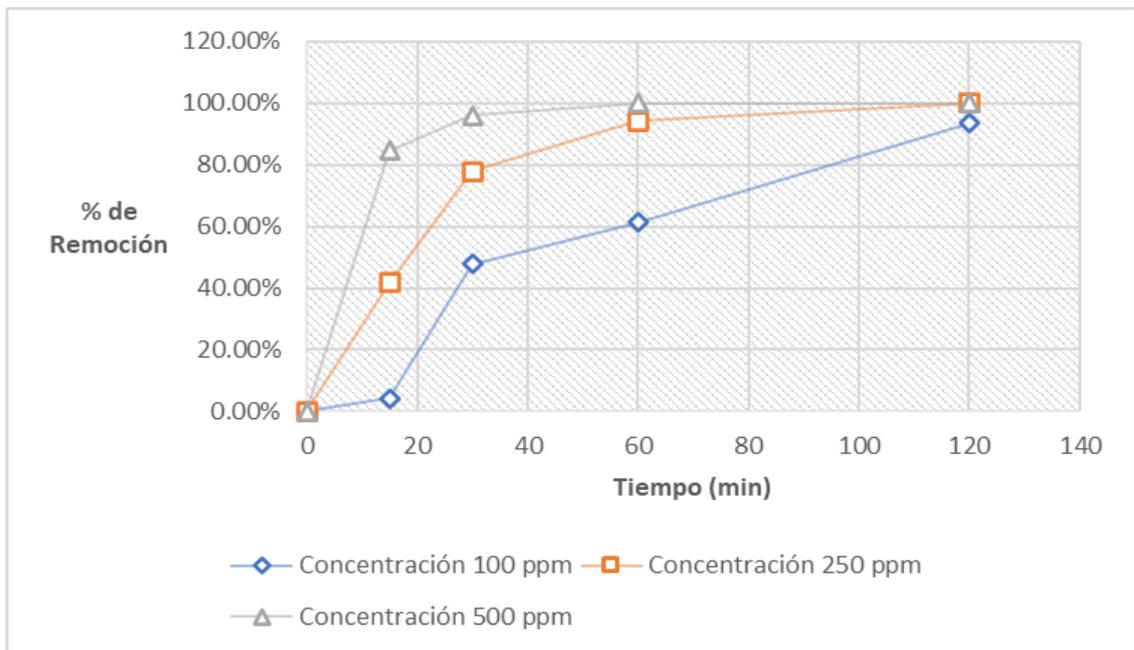


Figura 3.3 Gráfico Remoción de Tensoactivos (%) vs tiempo (min) de los resultados del Sistema UV/H₂O₂ a concentraciones de H₂O₂ a 100, 250, 500 ppm

Según los resultados obtenidos en la experimentación del sistema Batch (Figura 3.3) se tiene que para obtener una remoción de tensoactivos mayor al 90%, con una concentración de 100 ppm se necesita un tiempo de contacto de 120 minutos, para 250 ppm un tiempo de contacto de 60 minutos y para 500 ppm un tiempo de contacto de 30 minutos. Es decir, que a mayor concentración de H₂O₂ menor será el tiempo de contacto necesario para la remoción requerida de tensoactivos. En la Figura 3.3 se observa como la curva de los experimentos con 500 ppm de H₂O₂ alcanzan más rápido el porcentaje de remoción de tensoactivos del 100%. Los resultados obtenidos coinciden con los estudios realizados por (Cubillos, Moncada. 2006), en donde realizan experimentos en un rango de 0 a 120 minutos, por lo que se pudo demostrar la efectividad del POA con UV/H₂O₂ para la remoción de tensoactivos del agua de la PTAR de la urbanización estudiada.

3.2.1 Resultados y análisis del peróxido residual de los experimentos del sistema Batch UV/H₂O₂ a escala de laboratorio.

Para conocer la concentración del peróxido residual se tomó una muestra cada 15, 30, 60 y 120 minutos, con el fin de calcular la cantidad de peróxido que no reaccionó durante la corrida del sistema para las concentraciones de 100, 250 y 500 ppm respectivamente. Con el procedimiento detallado en el Capítulo 2 sección 2.4.2 se obtuvo la absorbancia de cada una de las muestras tomadas, y posteriormente con la curva de calibración (Apéndice B) se calculó la concentración peróxido residual en mg/l en los diferentes tiempos de contacto.

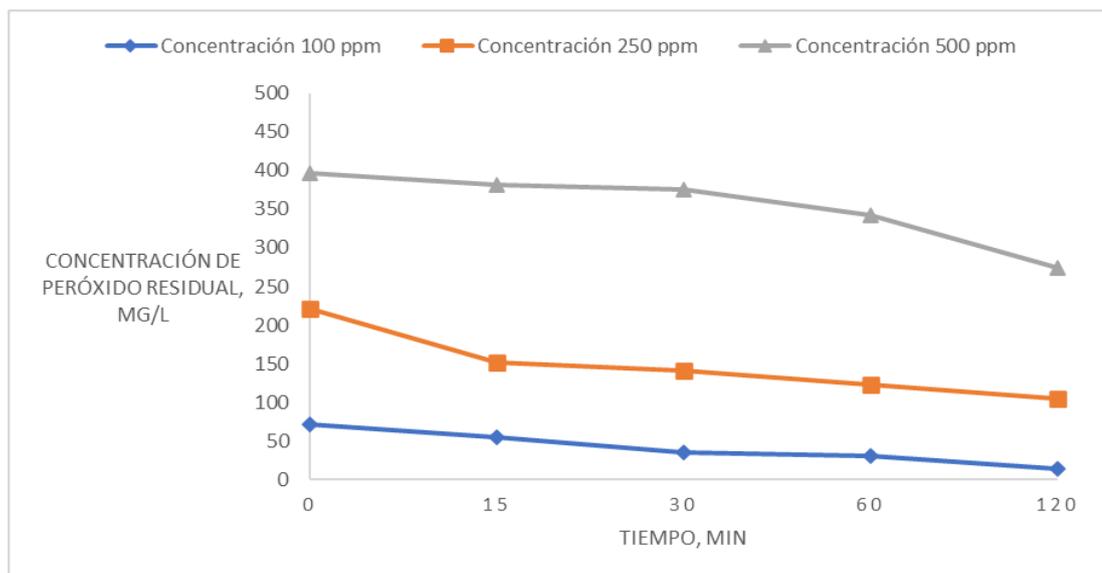


Figura 3.4 Gráfico concentración H₂O₂ residual (mg/l) vs tiempo (min) para los experimentos del sistema Batch

Según los resultados obtenidos la concentración de peróxido residual en cada caso estudiado disminuye con el tiempo (Figura 3.4), por lo que se puede evidenciar que existe la degradación del peróxido de hidrógeno en las muestras tratadas con el sistema Batch. Esto es importante, ya que como se menciona en el Capítulo 1 sección 1.4.4.4 una concentración excesiva de H₂O₂ podría causar un efecto inhibitorio en su degradación,

demostrando que los rangos de concentración elegidos para los experimentos fueron efectivos.

3.3 Resultados y análisis de los experimentos del sistema continuo UV/H₂O₂ a escala de laboratorio

La concentración de peróxido de hidrógeno fue calculada basada en la relación encontrada entre tiempo de residencia y dosificación de peróxido de hidrógeno. (Figura 3.5). El caudal seleccionado para la prueba en continuo fue el que la bomba sumergible empleada podía proveer. Para el sistema continuo UV/H₂O₂ se armó una estructura diferente (Figura 2.5), la muestra mezclada con peróxido de hidrógeno era bombeada hacia una cámara rectangular en donde la lámpara UV no se encontraba en contacto directo con el agua residual a tratar.

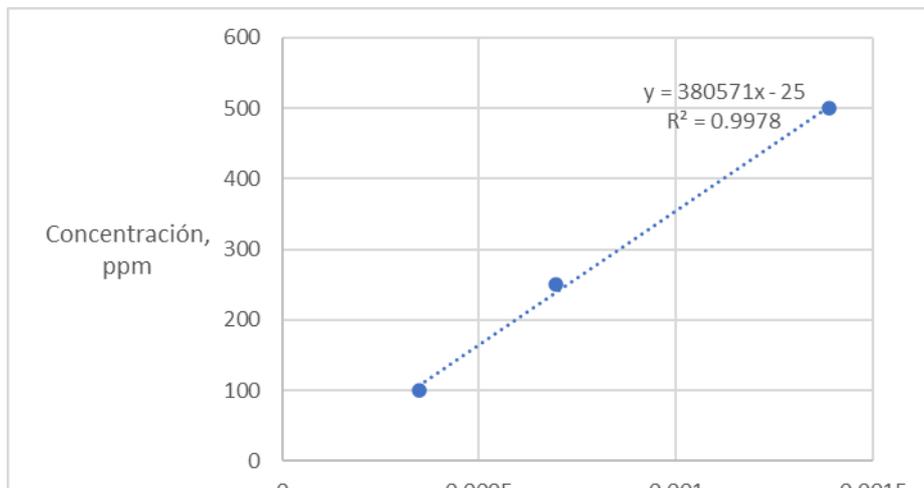


Figura 3.5 Relación de la concentración de H₂O₂ con respecto al caudal tratado.

Tabla 3.2 Resultados de la corrida del sistema continuo a escala de laboratorio

Fecha de muestreo	17-ago-22	
Concentración de Peróxido de Hidrógeno	18300	ppm
Cantidad de corridas	4	-
Concentración de tensoactivos inicial	20.37	mg MBAS/l
Concentración de tensoactivos finales	16.85	mg MBAS/l
Porcentaje de Remoción de tensoactivos	17.28	%

La concentración de H_2O_2 calculada fue de 18300 ppm, una corrida del sistema para 18 litros fue de aproximadamente de 15 min resultando que la remoción de tensoactivos para este caso no fue significativa. Esto se puede deber a que a diferencia del sistema Batch en el sistema continuo la luz UV no se encontraba en contacto directo con el agua, lo que disminuía el área de contacto y por consiguiente la dosis UV. Por este motivo, se procedió a pasar la muestra de agua cuatro veces por el sistema continuo con el objetivo de simular cuatro lámparas y poder aumentar la incidencia de luz UV en el sistema. Sin embargo, el porcentaje de remoción solo fue de tan solo 17.28% demostrando que la remoción es deficiente para este arreglo de sistema fotoquímico.

3.4 Resultados y análisis microbiológicos de coliformes en el agua tratada por el sistema UV/H₂O₂

Se realizó la identificación de colonias de coliformes totales presentes en base a la metodología descrita en el capítulo 2, sección 2.6, empleando la muestra de agua muestreada luego del filtro facultativo y otra con la muestra tratada mediante el sistema fotoquímico. Se evidenció la disminución significativa de colonias de coliformes (Figuras 3.3 y 3.4), obteniendo que la muestra sin tratar presentó 106 unidades formadoras de colonias por ml (UFC/ml), mientras que la muestra tratada por el sistema presentó solo 10 UFC/ml, alejándose significativamente del límite máximo permitido por la normativa MAAE (Tabla 1.1). Este resultado se consigue gracias a la función germicida de la lámpara UV, ya que puede penetrar

las paredes celulares de microorganismos, como es mencionado en el capítulo 1.4.4.4.

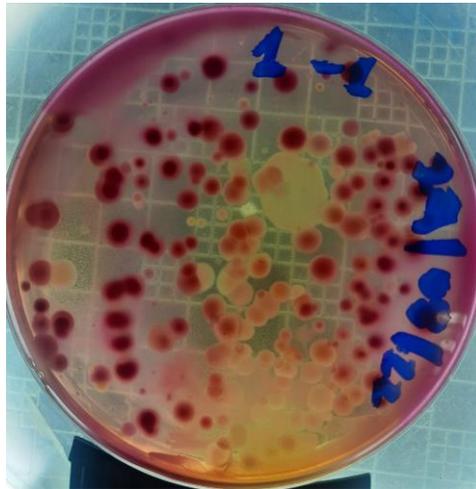


Figura 3.6 Presencia abundante de colonias de coliformes en muestra de agua sin tratamiento UV/ H₂O₂

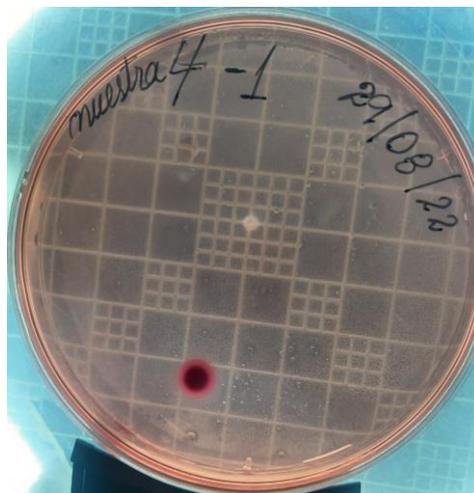


Figura 3.7 Colonia de coliforme después de tratamiento UV/ H₂O₂

3.5 Diseño de sistema Batch UV/H₂O₂ para prueba piloto en la PTAR

Para el diseño del prototipo piloto UV/H₂O₂ se eligió el sistema de forma Batch con dosificación de 250 ppm de H₂O₂ como el más apropiado para ser implementado en la PTAR debido a las múltiples ventajas que éste ofrecía en base a los resultados obtenidos. Se evidenció una remoción de tensoactivos mayor al 90% en 60 minutos (Figura 3.3), reducción de presencia de coliformes en el agua (Figuras 3.5 y 3.6) y una disminución significativa de la turbiedad en el agua (Figura 3.8). Durante las experimentaciones el parámetro de turbiedad inicial de las muestras tomadas presentó variaciones, sin embargo, el porcentaje de remoción de tensoactivos para los 60 minutos no se vio afectado, además los otros parámetros como pH, conductividad, y SDT no presentaron cambios significativos que representaran inconvenientes con el tratamiento.

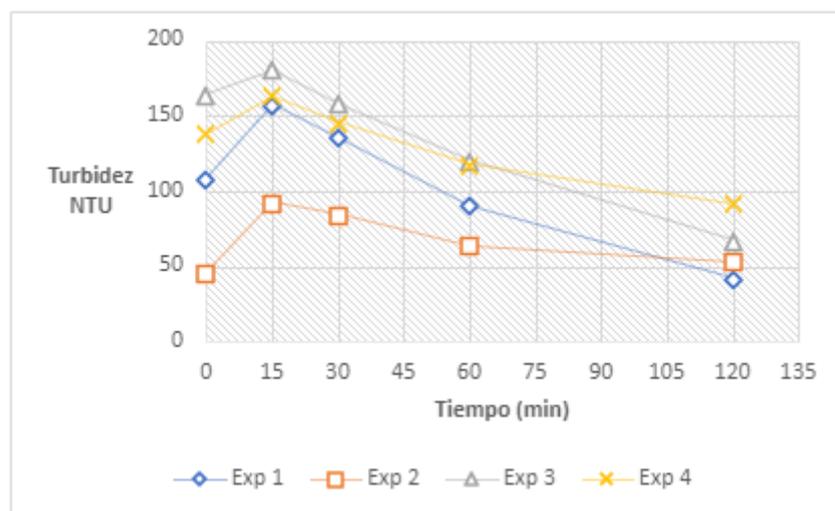


Figura 3.8 Comportamiento de la Turbiedad en relación con el tiempo de exposición del agua en el sistema.

El diseño propuesto (Figura 3.6) consiste en dos tanques en paralelo a un lado de la cámara de recepción para retener el efluente del filtro facultativo. El agua es dirigida con una bomba desde la cámara hacia la parte inferior de los tanques para ser mezclada con el peróxido de hidrógeno con la ayuda de un dosificador. En el centro de la tapa de cada tanque se encontrará una lámpara UV posicionada verticalmente hacia el tanque con agua para que se dé respectivo

tiempo de contacto de 60 minutos. El agua tratada sale por la parte superior de los tanques para ser recirculada a la cámara de recepción del Filtro Facultativo.



Figura 3.9 Propuesta de diseño del sistema Batch a escala piloto para la PTAR

Los cálculos de diseño se realizaron para el caudal más alto medido en la planta de 1.072 l/s, por lo que se asegura que con dos tanques de capacidad de 2500 L abastecerán a la planta de tratamiento. Por otro lado, la potencia de 55 W las lámparas UV se eligió de tal manera que la dosis UV sea suficiente para que junto a la dosis de peróxido de 250 ppm puedan darse las reacciones para la generación de hidroxilos. Estos hidroxilos son los que degradaran los tensoactivos que no han sido correctamente removidos de las etapas anteriores del Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto (SAAM) y se pueda cumplir con el límite permisible de la norma ecuatoriana vigente (Tabla 1.1). Las limitaciones con respecto al sistema planteado es que fue diseñado para que opere solo durante 8 horas al día, en los horarios en donde las actividades de los residentes de la urbanización son más concurridas (5-8 am, 12-2 pm y 6-9 pm), esto con el fin que el proyecto para este caso de estudio tenga mejor viabilidad para su implementación.

3.6 Análisis de costos

De acuerdo con el diseño propuesto en la sección 3.5 se procedió a realizar el análisis de la inversión que se necesita para que éste pueda ser implementado, mediante la cotización del reactivo, los equipos empleados, materiales y consumo energético (tablas 3.3 y 3.4). El costo de inversión se considera únicamente en el primer mes y posteriormente se mantiene un gasto fijo que es el reactivo y la cantidad de energía eléctrica consumida. Cabe señalar que los costos son aproximados, puesto que estos dependen de la marca y el proveedor donde se adquieran.

Tabla 3.3 Tabla de especificaciones de precios para equipos y materiales del diseño piloto

	Precio x unidad	Cantidad	Total
Precio Kit Lampara UVC 55W	80	2	160
Tanque 2500 L	277	2	554
Bomba centrífuga	254.51	1	254.51
Tuberías y accesorios	-	-	50
Peróxido de Hidrógeno (caneca 30 Kg al 50%)	45.9	15	706.63968
Dosificador de Peróxido	258.94	2	517.88
	Costo de inversión materiales y equipos		\$2243.03

Tabla 3.4 Aproximación de gasto mensual energético

Costo unitario Energía KWh	0.097	\$/Kwh
Potencia bomba	0.633	kw
Potencia luz Uv (2 luces)	0.11	kw
Potencia Bomba dosificadora	0.5	Kw
Potencia total	0.993	kw
horas de uso x mes	240	h
Consumo total mensual	238.32	Kwh
Total a pagar mensualmente en energía	29	\$

El costo de inversión para la implementación del sistema a escala piloto sería de \$2272 el primer mes y el gasto mensual fijo sería \$736 aproximadamente.

Es importante mencionar que las luces UV tienen un tiempo de vida de 10000 h, por lo cual, el cambio de estas lámparas se realizaría cada 3 años y medio aproximadamente.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones Y Recomendaciones

Conclusiones

- En base a observaciones microbiológicas realizadas se evidenció la presencia de bacterias filamentosas y relaciones no ideales de C:N:P para sistemas anaeróbicos, lo cual provoca que exista una mala sedimentación, pérdida de oxígeno disuelto y una deficiente remoción de materia orgánica. Debido a esto, parámetros como tensoactivos y coliformes resultan elevados, evidenciándose en el exceso de espuma en la salida del filtro facultativo, así como el olor y aspecto desagradable del efluente. Concluyéndose que no solo es necesario un sistema que remueva tensoactivos, sino que también sea capaz de mejorar las condiciones en el sistema biológico para promover una comunidad de microorganismos adecuados en el Sistema Anaeróbico Múltiple Mixto.
- Entre los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) la combinación de peróxido hidrogeno (H_2O_2) con luz ultravioleta (UV) posee la ventaja de que además de que la radiación UV-C actúa como fuente de energía para potenciar la producción de radicales de hidroxilos que degradan los tensoactivos, también funciona como germicida para los microorganismos. Por otro lado, el peróxido de hidrógeno es una sustancia altamente oxidante que a diferencia de ozono y de los reactivos Fenton es comercialmente más accesible y al degradarse rápido en el agua no representa toxicidad para el medio acuático. Por estos motivos, un sistema UV/ H_2O_2 es una tecnología que puede asistir al tratamiento terciario (Filtro Facultativo) de la planta de tratamiento de agua residual doméstica estudiada para la remoción de tensoactivos sin la necesidad de la implementación de equipos sofisticados o el consumo de productos químicos tóxicos.

- Se evaluaron dos posibles sistemas a ser implementados, uno Batch y otro continuo con el fin de encontrar el más efectivo respecto al porcentaje de remoción de tensoactivos, reducción de coliformes y turbiedad. Las variables modificadas incidieron considerablemente a los resultados obtenidos de los sistemas como el área de contacto, el flujo de agua empleado y volumen de agua a tratar, por lo cual no se obtiene resultados favorables en el sistema continuo y mostrando este arreglo como deficiente porque existe un efecto sinérgico entre el tiempo de residencia y la concentración de H_2O_2 .
- El sistema Batch a escala de laboratorio con dosis de H_2O_2 de 250 ppm, dosis UV de 122514.14 mWs/cm² y un tiempo de exposición UV de 60 minutos mostró dominantes ventajas, en especial, un porcentaje de remoción de tensoactivos mayor al 90% indiferentemente de la turbiedad del efluente del filtro facultativo. A partir de estos resultados, se diseñó el prototipo piloto para la planta de tratamiento estudiada de tal forma que se requiera poca área para su montaje, un control operacional sencillo, y una fácil limpieza y reemplazo de equipos.
- El sistema Batch UV/ H_2O_2 propuesto disminuye significativamente la presencia de colonias de coliformes totales desde 106 UFC/ml a 10 UFC/ml (sección 3.4), beneficiando la reducción de bacterias patógenas en el agua que perjudican al medio ambiente y causan una contaminación bacteriológica. Se establece la luz ultravioleta como el principal actor causante de la eliminación de coliformes y se reafirma su función germicida en ondas longitudinales de 254 nm que permite el cumplimiento del valor máximo permitido en la normativa de coliformes en el agua de descarga.
- Se evaluó el prototipo y se considera tecnológicamente viable por la fácil accesibilidad a los equipos que se requieren como lo son la luz UV-C, bomba centrífuga y bomba dosificadora de químicos. Sin embargo, se

evidencia un costo de inversión un poco elevado, definido en \$2272 aproximadamente y en el gasto fijo mensual que es \$736, considerando que la PTAR no genera ingresos para la recuperación de estos.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar más investigaciones para el sistema continuo UV/H₂O₂ en donde el contacto de la radiación UV con el agua residual sea directo y que se emplee una bomba peristáltica que permita la variación de caudales para un mejor estudio del caso.
- Se sugiere realizar un análisis de demanda de cloro del agua residual antes y después del tratamiento con UV/H₂O₂ para corroborar en qué medida se puede estimar la dosis de oxidantes, como cloro, en la etapa de desinfección de la PTAR. O incluso, la necesidad de disminuir la dosificación al ya tratar el agua con el sistema propuesto.
- La acumulación de materia orgánica en las paredes de la cámara de recibimiento del filtro facultativo y el área posterior al vertedero ocasionado por los residuos de la espuma que se forma impide una buena calidad del efluente, por lo cual se sugiere la limpieza profunda y periódica en estas áreas.
- Se recomienda el cambio de las plantas ornamentales del filtro facultativo por plantas vetiver, debido a que las plantas ornamentales que se encuentran sembradas actualmente no aportan de forma efectiva en la depuración de materia orgánica y nutrientes contenidos en el agua. Por otro lado, en base documentos bibliográficos, las plantas vetiver brindan mayor eficiencia en la remoción de nitrógeno, fósforo, coliformes, conductividad eléctrica, entre otros.

- Se recomienda realizar un repotenciamiento biológico en los reactores de tratamiento primario (Reactores Baffle) y tratamiento secundario (Reactores FAFA) para mejorar la degradación de materia orgánica, lo cual permitiría que la carga orgánica con la que el agua entre al sistema UV/H₂O₂ propuesto sea menor.

BIBLIOGRAFÍA

- Artículo, S., de Tema, R., Universidad, R., & Salud, Y. (2013). UNIVERSIDAD Y SALUD [72]. In *Año* (Vol. 15, Issue 1).
- Bes Monge, Sra. Sarai, Dr. Adrián M. .. Silva, and Dr. Christophe Bengoa. 2016. *Manual Técnico Sobre Procesos de Oxidación Avanzada Aplicados Al Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*.
- Bluegold. 2020. "Comparativa de Membranas Para El Tratamiento de Aguas." *Artículos Técnicos*.
- Germani, Raimondo, Marzia Bini, Simona Fantacci, Federica Simonetti, Matteo Tiecco, Eleonora Vaioli, and Tiziana Del Giacco. 2021. "Influence of Surfactants in Improving Degradation of Polluting Dyes Photocatalyzed by TiO₂ in Aqueous Dispersion." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 418(April):113342. doi: 10.1016/j.jphotochem.2021.113342.
- INEC. 2017. "Guayaquil En Cifras." *Noticias*.
- INEC. 2021. "Boletín Técnico No 04-2020-GAD Municipales Económica En Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Agua Potable y Saneamiento." (04).
- Kowalska, Izabela. 2008. "Surfactant Removal from Water Solutions by Means of Ultrafiltration and Ion-Exchange." *Desalination* 221(1-3):351-57. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.094.
- Krishnan, Smita, Kritika Chandran, and Chandra Mohan Sinnathambi. 2016. "Wastewater Treatment Technologies Used for the Removal of Different Surfactants: A Comparative Review." *International Journal of Applied Chemistry* 12(4):727-39.
- MAAE-Acuerdo Ministerial 097-A. 2015. "Registro Oficial Suplemento 387 de 4 de Noviembre de 2015." *Libro VI, Anexo 5* 184.
- Mirbahoush, Seyyed Mehdi, Naz Chaibakhsh, and Zeinab Moradi-Shoeili. 2019. "Highly Efficient Removal of Surfactant from Industrial Effluents Using Flaxseed Mucilage in Coagulation/Photo-Fenton Oxidation Process." *Chemosphere* 231:51-59. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.118.

- Molina, Julio Cesar Saldarriaga, Juan Manuel Garrido Fernández, Dora Angela Hoyos Ayala, and Mauricio A. Correa Ochoa. 2010. "Remoción Simultánea de Carbono, Nitrógeno y Fósforo de Aguas Residuales En Un Sistema Híbrido UCT Modificado." *DYNA (Colombia)* 77(162):39–48.
- Moncada Fuentes, Juan Esteban, and David Ricardo Cubillos Alarcón. 2006. "Evaluación a Nivel de Laboratorio de Un Sistema de Remoción Fotocatalítico de Tensoactivos Aniónicos." *Universidad de La Salle* (1):1–5.
- Mora Molina, Jesús, and Guillermo Calvo Brenes. 2010. "Estado Actual de Contaminación Con Coliformes Fecales de Los Cuerpos de Agua de La Península de Osa." *Tecnología En Marcha* 23(Nº. Extra 5):34–40.
- Palmer, Matthew, and Hazel Hatley. 2018. "The Role of Surfactants in Wastewater Treatment: Impact, Removal and Future Techniques: A Critical Review." *Water Research* 147:60–72. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.039.
- Rekhate, Chhaya V., and J. K. Srivastava. 2020. "Recent Advances in Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Treatment of Wastewater- A Review." *Chemical Engineering Journal Advances* 3(September):100031. doi: 10.1016/j.cej.2020.100031.
- Riffat, Rumana. 2015. *Wastewater Treatment and Engineering Rumana Riffat*.
- Thompson, L. J., V. Gray, D. Lindsay, and A. Von Holy. 2006. "Carbon:Nitrogen:Phosphorus Ratios Influence Biofilm Formation by Enterobacter Cloacae and Citrobacter Freundii." *Journal of Applied Microbiology* 101(5):1105–13. doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.03003.x.
- El Universo. 2018. "En Vía a La Costa El Sistema de Alcantarillado No Llega." *Comunidad*, October.
- Ying, Guang-Guo. 2006. "Fate, Behavior and Effects of Surfactants and Their Degradation Products in the Environment." *Environment International* 32(3):417–31. doi: 10.1016/j.envint.2005.07.004.
- Ziembowicz, Sabina, and Małgorzata Kida. 2022. "Limitations and Future Directions of Application of the Fenton-like Process in Micropollutants Degradation in Water and Wastewater Treatment: A Critical Review." *Chemosphere* 296(January). doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134041.

APÉNDICES

APÉNDICE A. ANÁLISIS DE LABORATORIO CERTIFICADO



LABORATORIO DE AGUAS
INTERAGUA C. LTDA.
INFORME DE ENSAYOS
LI-E-04039-21



FECHA DEL INFORME: 29/12/2021

DATOS DEL CLIENTE

SOLICITADO POR:	
DIRECCIÓN:	

DATOS DE LA MUESTRA

LUGAR DE MUESTREO			
PLAN DE MUESTREO	NO APLICA	METODO DE MUESTREO	NO APLICA
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYO	AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	TECNICO DE MUESTREO	JORGE LEON
TIPO DE MUESTREO	MUESTRA COMPUESTA	CADENA DE CUSTODIA	LI/2021/4039
FECHA/HORA DE MUESTREO	06/12/2021 06:30 - 06/12/2021 17:30	FECHA/HORA DE RECEPCION	06/12/2021 21H55
CONDICIONES AMBIENTALES	Temperatura (°C): 23,0+/- 2,1	Humedad (%): 60+/- 7	
FECHA ENSAYO	INICIO: 06/12/2021	FIN: 17/12/2021	

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	ACETES Y GRASAS mg/l	CLORUROS mg/l	COLIFORMES FECALES NMP/100 ml	COLIFORMES TOTALES NMP/100 ml	COLOR LD** = 2 UC	CONDUCTIVIDAD uS/cm
40392101 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar013066-21	40,8	53	35 000 000	92 000 000	59	887
40392102 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar013067-21	< 10	43	1 600 000	1 600 000	22	762
MÉTODO USADO		PEE/LI/01	PEE/LI/12	PEE/LI/57	PEE/LI/57	PEE/LI/45	PEE/LI/34
EQUIPO		LI-037	LI-V-029	LI-054	LI-054	LI-196	LI-091
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	DEMANDA BIQUÍMICA DE OXÍGENO mg/l	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO LD** = 25 mg/l	FOSFORO TOTAL LD** = 0.3 mg/l	HIDROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO LD** = 3 mg/l	N-AMONÍACAL LD** = 0.04 mg/l	NITRATO-N* LD** = 0.06 mg/l
40392101 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar013066-21	290	398	6,3	< 10	22,4	0,1
40392102 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar013067-21	33	66	4,2	< 10	7,0	1,0
MÉTODO USADO		PEE/LI/06	PEE/LI/74	PEE/LI/84	PEE/LI/44	PEE/LI/36	PEE/LI/37
EQUIPO		LI-001	LI-172	LI-196	LI-075	LI-196	LI-196
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	NITRITO-N LD** = 0.010 mg/l	NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL mg/l	PH	SALINIDAD* LD** = 0.1 g/l	SOLIDOS DISUELTOS TOTALES*	SOLIDOS SEDIMENTABLES
40392101 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar013066-21	0,04	65,0	7,2	0,4	480	< 0,5
40392102 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar013067-21	0,13	44,1	7,0	0,4	372	< 0,5
MÉTODO USADO		PEE/LI/38	PEE/LI/23	PEE/LI/08	PEE/LI/58	PEE/LI/25	PEE/LI/13
EQUIPO		LI-196	LI-196	LI-059	LI-091	LI-037	LI-V-035

Figura A. 1 Análisis de parámetros de efluente realizados en Diciembre 2021

FECHA DEL INFORME: 21/01/2022

DATOS DEL CLIENTE

SOLICITADO POR:	
DIRECCIÓN:	

DATOS DE LA MUESTRA

LUGAR DE MUESTREO			
PLAN DE MUESTREO	NO APLICA	METODO DE MUESTREO	NO APLICA
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYO	AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	TECNICO DE MUESTREO	JORGE LEON
TIPO DE MUESTREO	MUESTRA COMPUESTA	CADENA DE CUSTODIA	LI/2022/0160
FECHA/HORA DE MUESTREO	07/01/2022 06:31 - 07/01/2022 17:15	FECHA/HORA DE RECEPCION	07/01/2022 21H01
CONDICIONES AMBIENTALES	Temperatura (°C): 23,0+/- 2,1	Humedad (%): 60+/- 7	
FECHA ENSAYO	INICIO: 07/01/2022	FIN: 21/01/2022	

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	ACETES Y GRASAS mg/l	CLORUROS mg/l	COLIFORMES FECALES NMP/100 ml	COLIFORMES TOTALES NMP/100 ml	COLOR LD** + 2 Uc	CONDUCTIVIDAD uS/cm
01602201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar000139-22	42,6	44	5 400 000	28 000 000	88	732
01602202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar000140-22	< 10	49	1 600 000	5 400 000	30	908
MÉTODO USADO		PEE/LI/01	PEE/LI/12	PEE/LI/57	PEE/LI/57	PEE/LI/45	PEE/LI/34
EQUIPO		LI-037	LI-V-029	LI-064	LI-064	LI-196	LI-091
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO * mg/l	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO LD** + 25 mg/l	FOSFORO TOTAL LD** + 0.3 mg/l	HIPOCROMÁTICOS TOTALES DE PETRÓLEO LD** + 3 mg/l	N-AMONÍACAL LD** + 0.04 mg/l	NITRATO-N * LD** + 0.06 mg/l
01602201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar000139-22	250	410	6,6	< 10	36,9	1,6
01602202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar000140-22	60	127	5,9	< 10	14,2	1,7
MÉTODO USADO		PEE/LI/72	PEE/LI/74	PEE/LI/64	PEE/LI/44	PEE/LI/36	PEE/LI/37
EQUIPO		LI-068	LI-172	LI-196	LI-075	LI-196	LI-196
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	NITRITO-N LD** + 0.010 mg/l	NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL mg/l	PH	SALINIDAD * LD** + 0.1 g/l	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES * mg/l	SÓLIDOS SEDIMENTABLES ml/l
01602201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar000139-22	0,09	58,0	6,9	0,4	330	0,6
01602202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar000140-22	0,12	36,9	8,0	0,5	328	< 0,5
MÉTODO USADO		PEE/LI/38	PEE/LI/23	PEE/LI/08	PEE/LI/68	PEE/LI/25	PEE/LI/13
EQUIPO		LI-196	LI-196	LI-059	LI-091	LI-037	LI-V-035

Figura A. 2 Análisis de parámetros de efluente realizados en Enero 2022

FECHA DEL INFORME: 08/03/2022

DATOS DEL CLIENTE

SOLICITADO POR:	
DIRECCIÓN:	

DATOS DE LA MUESTRA

LUGAR DE MUESTREO			
PLAN DE MUESTREO	NO APLICA	METODO DE MUESTREO	NO APLICA
DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYO	AGUA RESIDUAL MUNICIPAL	TECNICO DE MUESTREO	JORGE LEON
TIPO DE MUESTREO	MUESTRA COMPUESTA	CADENA DE CUSTODIA	LI/2022/0605
FECHA/HORA DE MUESTREO	11/02/2022 06:17 - 11/02/2022 17:15	FECHA/HORA DE RECEPCION	11/02/2022 22H24
CONDICIONES AMBIENTALES	Temperatura (°C): 23,4+/- 2,4	Humedad (%): 64+/- 6	
FECHA ENSAYO	INICIO: 11/02/2022	FIN: 08/03/2022	

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	ACEITES Y GRASAS mg/l	CLORUROS mg/l	COLIFORMES FECALES NMP/100 ml	COLIFORMES TOTALES NMP/100 ml	COLOR LD ⁶⁰⁰ = 2 UC	CONDUCTIVIDAD uS/cm
06052201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar001282-22	62,1	54	13 000 000	24 000 000	59	843
06052202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar001283-22	12,4	46	9 200 000	16 000 001	33	858
MÉTODO USADO		PEE/LI/01	PEE/LI/12	PEE/LI/57	PEE/LI/57	PEE/LI/45	PEE/LI/34
EQUIPO		LI-037	LI-V-029	LI-054	LI-054	LI-196	LI-091
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO * mg/l	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO LD ²⁰ = 25 mg/l	FOSFORO TOTAL LD ²⁰ = 0.3 mg/l	HIROCARBUROS TOTALES DE PETRÓLEO LD ²⁰ = 3 mg/l	N-AMONÍACAL LD ²⁰ = 0.04 mg/l	NITRATO-N * LD ²⁰ = 0.06 mg/l
06052201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar001282-22	320	388	5,6	< 10	25,8	0,1
06052202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar001283-22	60	116	3,6	< 10	9,3	0,3
MÉTODO USADO		PEE/LI/72	PEE/LI/74	PEE/LI/84	PEE/LI/44	PEE/LI/36	PEE/LI/37
EQUIPO		LI-068	LI-172	LI-196	LI-075	LI-196	LI-196
IDENTIFICACIÓN DEL OBJETO DE ENSAYO	CÓDIGO OBJETO DE ENSAYO	NITRITO-N LD ²⁰ = 0.010 mg/l	NITROGENO TOTAL KJELDAHL mg/l	PH	SALINIDAD * LD ²⁰ = 0.1 g/l	SOLIDOS DISUELTOS TOTALES * mg/l	SOLIDOS SEDIMENTABLES ml/l
06052201 ENTRADA A LA ESTACION DE BOMBEO	Ar001282-22	0,05	53,5	7,1	0,4	430	< 0,5
06052202 SALIDA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	Ar001283-22	0,09	20,6	6,8	0,4	418	< 0,5
MÉTODO USADO		PEE/LI/38	PEE/LI/23	PEE/LI/08	PEE/LI/58	PEE/LI/25	PEE/LI/13
EQUIPO		LI-196	LI-196	LI-059	LI-091	LI-037	LI-V-035

Figura A. 3 Análisis de parámetros de efluente realizados en Febrero 2022

APÉNDICE B. CÁLCULOS DE DISEÑO PARA DISEÑO DE PROTOTIPO PROPUESTO

Apéndice B.1. Cálculo de diseño para la bomba

$$HP = \frac{QH}{76\eta}$$

Tabla B. 1. Especificaciones de diseño requeridas para la selección de una bomba apropiada

Q	1.072	l/s
H	3.000	m
η	0.750	
P	0.056	HP
P	42.038	W

Apéndice B.2. Cálculos de diseño para los tanques necesarios en sistema Batch

$$V = Q * TRH$$

Tabla B. 2. Especificaciones de diseño requeridas para tanques en prototipo de Sistema Batch

Caudal más alto de la planta:	1.072	l/s
	0.001	m ³ /s

Tiempo de residencia escogido:	60.00	min
	3600.00	s
Volumen necesario para el tanque:	3.86	m ³
	3859.62	l
Cantidad de tanques:	2	
Volumen de cada tanque:	1.930	m ³
	1929.81	l

Tabla B. 3. Especificaciones de tanque a utilizar

Especificaciones del tanque elegido		
Capacidad	2500	l
Altura	1.52	m
Diametro	2.568	m
Diametro tapa	0.55	m
Material	Polietileno	

Apéndice B.3. Cálculos de diseño para luces UV necesarias en sistema Batch piloto

$$A_s = 2 * \pi * r * h$$

$$Dosis\ UV = Intensidad * tiempo$$

Tabla B. 4. Especificaciones de diseño Luz UV

Potencia	55	W
Altura	114.80	cm
Radio	0.750	cm
Área	540.98	cm ²
Intensidad	101.67	mW/cm ²
Tiempo de contacto	3600.00	s
Dosis UV	366000.91	mWs/cm ²

APÉNDICE C. CURVA DE CALIBRACIÓN DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO AL 30% W/W MARCA SCHARLAU

