



Evaluación de la eficiencia de un tratamiento secundario de lodos activados a escala laboratorio en las aguas residuales domésticas de la Planta del municipio de Andes, Suroeste antioqueño

Oscar Daniel Colorado Bedoya

Trabajo de grado presentado para optar al título de Administrador Ambiental y Sanitario

Asesor

Santiago Erazo Cabrera, Microbiólogo Industrial y Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad Nacional de Salud Pública Héctor Abad Gómez
Administración Ambiental y Sanitaria
Andes, Antioquia, Colombia
2023

Cita

(Colorado Bedoya, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Colorado Bedoya, O. D. (2023). *Evaluación de la eficiencia de un tratamiento secundario de lodos activados a escala laboratorio en las aguas residuales domésticas de la Planta del municipio de Andes, Suroeste antioqueño* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Andes, Colombia.



Biblioteca Seccional Suroeste (Andes)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre por guiarme con sabiduría, por infundirme valores, por brindarme su confianza y apoyo incondicional y permitirme culminar con satisfacción esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia Seccional Suroeste en cabeza de la directora Sara María Márquez Girón y mi compañera de trabajo Sindy Suárez por el apoyo, por permitirme el espacio y el desarrollo de toda la experimentación.

Al personal administrativo de la Empresa de Servicios Públicos y al operativo de la Planta de Tratamiento por permitirme el desarrollo de toda la experimentación.

A todos los profesores que compartieron su valioso conocimiento y experiencia, en especial a la profesora Yamilet Arcos.

A mi asesor académico Santiago Erazo por su compromiso y dedicación para con este trabajo.

A mi madre Gloria y mi pareja Tatiana que me brindaron su apoyo durante toda mi carrera profesional y en especial en este trabajo de grado.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema	11
2 Justificación	15
3 Objetivos	16
4 Hipótesis	17
5 Marco teórico	18
6 Metodología	28
7 Resultados	39
8 Discusión	56
9 Conclusiones	60
10 Recomendaciones	61
Referencias	62

Lista de tablas

Tabla 1 Eficiencias de los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	19
Tabla 2 Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles.....	22
Tabla 3 Principales sistemas de procesos biológicos en Colombia.....	23
Tabla 4 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel internacional	24
Tabla 5 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional	24
Tabla 6 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional	25
Tabla 7 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional	26
Tabla 8 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel departamental	26
Tabla 9 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel departamental	27
Tabla 10 Velocidad de sedimentación lodos muestreo	39
Tabla 11 Relación IVL y grado de sedimentabilidad.....	40
Tabla 12 Resultados parámetros muestreo	41
Tabla 13 Comportamiento de variables en función del tiempo -Activación Inóculo- Funcionamiento en lote	42
Tabla 14 Tiempos de Retención Hidráulica evaluados para el estudio.....	43
Tabla 15 Valores DQO y sus valores de porcentaje de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados	44
Tabla 16 Valores de SST en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados ...	45
Tabla 17 Valores de ST en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados	45
Tabla 18 Parámetros de control en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados	46
Tabla 19 Valores DQO y sus porcentajes de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados.....	47
Tabla 20 Parámetros de control en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados	47
Tabla 21 Valores DQO y sus porcentajes de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados.....	50
Tabla 22 Parámetros de control en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados	50

Lista de figuras

Figura 1 Esquema del proceso de lodos activados convencional	20
Figura 2 Esquema del funcionamiento del sistema a escala laboratorio.....	28
Figura 3 Esquema lodos activados a escala laboratorio.....	29
Figura 4 Esquema del reactor de mezcla completa a escala laboratorio para funcionar de forma continua	30
Figura 5 (A) Toma de agua residual en efluente de PTAR (B) Toma de lodo (purga de sedimentadores).....	31
Figura 6 (A) Prueba de velocidad de sedimentación e IVL tiempo cero. (B) Prueba de velocidad de sedimentación e IVL 30 minutos.....	32
Figura 7 Acondicionamiento del inóculo - proceso en lote	34
Figura 8 Montaje experimental completo del sistema funcionando en modo continuo	35
Figura 9 Procedimiento Tinciones Microbiológicas	36
Figura 10 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q ₂	48
Figura 11 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q ₂	49
Figura 12 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q ₃	52
Figura 13 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q ₃	53
Figura 14 Fotografías de microorganismos observados en 40 y 100X en el tratamiento con Q ₃	54
Figura 15 Caracterización del flóculo observados en 10 y 40X en el tratamiento de lodos activados.....	55

Lista de gráficas

Gráfica 1 Velocidad de sedimentación lodos muestreo	40
Gráfica 2 Comportamiento de variables en función del tiempo -Activación Inóculo- Funcionamiento en lote	42
Gráfica 3 Resultados de DQO con $Q_1=2,4$ mL/min.....	44
Gráfica 4 Resultados de DQO con $Q_2=2,9$ mL/min.....	46
Gráfica 5 Resultados DQO con $Q_3=8,2$ mL/min	49
Gráfica 6 Velocidad de sedimentación del LMC.....	51

Lista de ecuaciones

Ecuación 1 Volumen de cada alícuota para muestreo compuesto.....	31
Ecuación 2 Índice Volumétrico de Lodos	32
Ecuación 3 Tiempo de Retención Hidráulica.....	34
Ecuación 4 Ecuación de la línea recta para calcular DQO.....	37
Ecuación 5 Eficiencia del Sistema	37

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ARD	Agua Residual Doméstica
ARnD	Agua Residual no Doméstica
DBO₅	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
IVL	Índice Volumétrico del Lodo
LMC	Licor de Mezcla Completa.
OD	Oxígeno Disuelto
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
Q	Caudal
RPM	Revoluciones Por Minuto
SSED	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendedos Totales
ST	Sólidos Totales
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico

Resumen

El proceso de lodos activados es ampliamente empleado para el tratamiento de las aguas residuales, el cual se compone de dos etapas: la primera, en la que se lleva a cabo la degradación microbológica de la materia orgánica y la segunda donde, por sedimentación, la biomasa generada en la primera es separada. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de un tratamiento secundario de lodos activados a escala laboratorio en las aguas residuales domésticas de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) del municipio de Andes, Suroeste antioqueño. Para ello, la experimentación inició con una caracterización del agua y el lodo de la planta para su posterior activación en un montaje en lote; seguidamente, para un proceso en continuo, donde se emplearon tres caudales diferentes y en los que se evaluó la Demanda Química de Oxígeno (DQO) para determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de mezcla completa. De esta forma, las eficiencias de remoción promedio en términos de DQO fueron de 77, 79 y 75% con caudales de 2,4, 2,9 y 8,2 ml/min respectivamente. Por lo tanto, con la implementación de los lodos activados a escala laboratorio, se logró que las concentraciones de contaminación medida como materia orgánica presente en el efluente de la PTAR fueran removidas a través de un proceso biológico.

Palabras clave: biológico, tratamiento, eficiencia, reactor, DQO.

Abstract

The activated sludge process is widely used for wastewater treatment and consists of two stages: the first, in which the microbiological degradation of organic matter takes place, and the second, in which the biomass generated in the first stage is separated by sedimentation. The objective of this work was to evaluate the efficiency of a laboratory-scale secondary activated sludge treatment of domestic wastewater from a wastewater treatment plant (WWTP) of the municipality of Andes, southwest of Antioquia. To this end, the experiment started with a characterization of the water and sludge from the plant for subsequent activation in a batch system; followed by a continuous process using three different flow rates, in which the Chemical Oxygen Demand (COD) was evaluated to determine the efficiency of organic matter removal in a full mix reactor. The average COD removal efficiencies were 77, 79 and 75% at flow rates of 2,4, 2,9 and 8,2 ml/min respectively. Therefore, by implementing laboratory-scale activated sludge, the concentrations of pollutants measured as organic matter present in the WWTP effluent were removed by a biological process.

Keywords: biological, treatment, efficiency, reactor, COD.

Introducción

La contaminación de las fuentes hídricas es uno de los mayores problemas que expone la relación del ser humano con los recursos naturales. La introducción de residuos líquidos al agua por vertimientos domésticos, implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica (Osorio- Rivera et al., 2020), por ejemplo, para consumo humano.

Como respuesta a esta problemática, se han desarrollado métodos para la reducción o eliminación de los contaminantes líquidos mediante tratamientos primarios, secundarios y terciarios que, en síntesis, buscan reducir o eliminar materia orgánica e inorgánica, metales pesados y microorganismos patógenos, bajo principios químicos, físicos y biológicos (Cuadrado & Cuartas, 2019).

Conforme a ello, los lodos activados son un proceso biológico para el tratamiento de aguas residuales mediante el uso de un cultivo de consorcio microbiológico disperso en forma de flóculos en un área de agitación mediante aireación artificial y alimentación con agua residual, el cual es capaz de metabolizar los contaminantes biológicos como son los orgánicos y nutrientes presentes en esa agua (Alpírez et al., 2017).

En ese orden de ideas, se evaluó la aplicación de un sistema de lodos activados a escala laboratorio a diferentes caudales (Q) y tiempos de retención hidráulico (TRH) con lodos y agua residuales provenientes de la PTAR del municipio de Andes, con el fin de contribuir al desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales domésticas en la región.

1 Planteamiento del problema

La estrecha relación entre el hombre y los recursos naturales como el agua deja un rastro indeleble en el mismo, debido a que el consumo de este genera residuos líquidos que, con frecuencia se disponen directamente a los cuerpos de agua. Por consecuencia, se han convertido en un problema ambiental de gran importancia, debido a que si no son tratados adecuadamente pueden, no solo alterar los ecosistemas, sino, a las poblaciones generando afectaciones a la salud pública (Vargas et al., 2020). Si aumenta la demanda total de agua, la cantidad de agua residual y carga contaminante de las mismas aumenta. Se estima que el 80% de las aguas residuales en el mundo se vierten al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento (Banco Mundial, 2020). Esto implica consecuencias perjudiciales para la salud humana, debido a la peligrosidad que implica consumir agua contaminada y el riesgo a infecciones y enfermedades; y a los ecosistemas acuáticos, que como consecuencia terminan desapareciendo por la rápida proliferación de algas invasoras que se nutren de todos los nutrientes que les proporcionan los residuos (Vásquez, 2017). Por lo tanto, es evidente que el problema ambiental, social y económico que implican estas aguas debe abordarse en los compromisos y acciones dirigidos a alcanzar las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS (PNUD, 2018).

En los países en desarrollo el tratamiento de aguas residuales sigue siendo una práctica no habitual debido a la carencia de infraestructura, capacidad técnica y financiación. Según el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, los países desarrollados tratan aproximadamente el 70% de sus aguas residuales, por otro lado, en los en vía de desarrollo, solo el 8% de sus aguas residuales reciben algún tipo de tratamiento. (UNESCO, 2017).

En Colombia para el año 2015, se generaron más de 1000 millones de m³ (ONU-HABITAT y OMS, 2021). Sin embargo, desde la perspectiva del Sistema de Naciones Unidas las estimaciones del *Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene* (JMP) de UNICEF/OMS, plantea que ese mismo año solo el 20% de la población del país contaba con gestión sostenible en saneamiento básico (PNUD, 2018).

El agua residual presenta características físicas como el color, olor y temperatura; químicas como compuestos orgánicos e inorgánicos; y biológicas que incluyen microorganismos, plantas y animales (Osorio- Rivera et al., 2020). Esta composición se debe a

la actividad humana que genera residuos líquidos procedentes de viviendas e industrias, afectando su calidad (Ceja de la Cruz, 2019). A esta problemática, se suma el vertimiento de residuos hospitalarios sin tratar y el uso de excesivo de medicamentos e insumos en la actividad agrícola y pecuaria que provocan concentraciones altas de estos desechos en el agua (UNESCO, 2017).

Con relación a la problemática antes expuesta, el municipio de Andes no es ajeno a la situación. Los vertimientos de aguas residuales en el área urbana se realizan sobre las quebradas La Chaparrala y La Chaparralita, afluentes del río San Juan, siendo la principal fuente afectada. Como solución, para el año 2003 en la primera etapa del Plan Maestro de Alcantarillado se construyó una PTAR, cuyo principal objetivo es la recuperación de la fuente del río San Juan, receptora del vertimiento de la planta (Ingeniería Total, 2007). La PTAR es de tratamiento primario y según el jefe del área de Planeación de la Empresa de Servicios Públicos de Andes, “la planta cuenta con una eficiencia de remoción del 40% para Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) y 30-70% de Sólidos Suspendidos Totales (SST)”. (Gutiérrez, J., comunicación personal, 28 de abril de 2022). La PTAR se compone de una serie de etapas de tratamiento preliminar y primario como un cribado donde se remueven sólidos de gran tamaño, desarenadores para decantación de arenas y sólidos no retenidos anteriormente, una canaleta Parshall para la medición de caudales, una trampa de grasas para la detención de grasas y espumas de detergentes; y así mismo, dos sedimentadores para la sedimentación de sólidos finos en suspensión. Además, también posee un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) para la estabilización de la materia orgánica generada en los sedimentadores, en la que se forma biomasa con alta actividad microbiológica (Ingeniería Total, 2007).

Dentro de este marco, existen diferentes tipos de procesos que se implementan en el mundo para la eliminación de los contaminantes contenidos en las aguas residuales: un pretratamiento para la retención de sólidos más grandes, un tratamiento primario para los más finos, un secundario para remover materia mediante procesos biológicos, y un terciario para la eliminación de contaminantes como agroquímicos (Ceja de la Cruz, 2019). En este sentido, el tratamiento se ha desarrollado a través de un enfoque de gradualidad en el que primero se eliminan sólidos en suspensión, un segundo en el que se transforma la materia orgánica en energía química, y un tercero en el que se remueven contaminantes químicos y se controla la contaminación microbiológica (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017).

En cuanto al tratamiento secundario que se ha desarrollado a lo largo de la historia del tratamiento de las aguas residuales, se aplican procesos biológicos que involucran microorganismos aerobios que oxidan la materia orgánica presente en el agua y la transforman en una más estable; es decir, eliminan la carga contaminante (Arcos, 2014). El oxígeno juega un rol muy importante, puesto que su presencia o ausencia condiciona el tipo de microorganismos que se encargan de transformar la materia orgánica presente en el agua residual (Lopez, A.;Cabrera, M.;Carrillo, 2017). Este tratamiento se conoce como lodos activados.

Con relación a la problemática antes descrita, el saneamiento básico es determinante de la salud y educación como factores ambientales y servicios sanitarios (PNUD, 2018). Por ello, se hace hincapié en la necesidad de invertir en programas y tecnologías para la reducción de las cargas contaminantes del agua y la potabilización para el consumo humano y extender una cobertura a la ruralidad, para reducir las brechas existentes.

Indiscutiblemente, es necesario avanzar en metodologías de tratamiento de aguas residuales domésticas (ARD) para la disminución de concentraciones de contaminantes sobre los cuerpos de agua. Para esto, se debe ampliar los sistemas actuales mediante la implementación de procesos biológicos para alcanzar una eficiencia de remoción más alta (Vargas et al., 2020). Por esta razón, se propone la aplicación de un sistema secundario de lodos activados a escala laboratorio para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la planta y evaluar su eficiencia en términos de remoción de materia orgánica.

1.1 Antecedentes

En Colombia, se han desarrollado diferentes estudios para evaluar la eficiencia en remoción de contaminantes mediante procesos biológicos. Por ejemplo, se han implementado sistemas de clarificación mediante lodos activados en la que la eliminación de la carga contaminante mostró una remoción de 76%, 80% y 80% de DQO, DBO₅ y SST, respectivamente, para ARD en la ciudad de Cali. (Vargas et al., 2020).

Por otro lado, el municipio de Andes cuenta con una PTAR construida en el año 2003 para el tratamiento de ARD generadas en la zona urbana (Ingeniería Total, 2007). Desde la Empresa de Servicios Públicos de Andes, se presta el servicio de alcantarillado que comprende

el transporte, la recolección, el tratamiento y vertimiento de las ARD que se originan en el casco urbano. Se recolectan las aguas mediante un sistema de redes y se transportan hacia la planta de tratamiento (Empresa de Servicios Públicos de Andes, 2020). Como componente adicional del sistema, la PTAR cuenta con un digestor anaerobio de flujo ascendente UASB cuyo propósito es la digestión de los lodos sedimentados en las unidades de sedimentación (Ingeniería Total, 2007). De esa manera, se cuenta con una unidad de tratamiento secundario.

Para el año 2017, se realizó un análisis de las aguas residuales a la entrada y la salida de la PTAR, cuyo objetivo fue verificar la efectividad del tratamiento, obteniendo un valor en el afluente de 510 mg/L de O₂ para DQO y 187 mg/L para SST y en el efluente de 417 mg/L de O₂ de DQO y 55 mg/L de SST (Zapata-Toro, 2017). Así, se evidencia una eficiencia de remoción del 18% y 70% para DQO y SST respectivamente. Además, para la DQO en el vertimiento, se nota un alto registro que sobrepasa el valor límite máximo permisible de 180 mg/L de O₂ establecido de en la Resolución 631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015). El vertimiento generado de la PTAR objeto de análisis y de reporte, se realiza en el canal de salida de los sedimentadores primarios y no al efluente del reactor UASB (Gutiérrez, J., comunicación personal, 28 de abril de 2022). Este último, transforma la materia y energía de los lodos generados en los sedimentadores primarios en lodos digeridos y con menor carga contaminante que luego se deshidratan hasta un 70% en lechos de secado para su posterior disposición final (Empresa de Servicios Públicos de Andes, 2020). En efecto, el reactor solo trata los lodos en mención. Es decir, los vertimientos realizados se realizan del efluente del sedimentador primario.

Debido a que las aguas residuales del municipio de Andes se caracterizan por ser altamente diluidas, se definió la construcción de un sedimentador primario para remover hasta un 40% de DBO₅ y hasta un 60% de SST. Aunque la eficiencia de remoción para DBO₅ de este sistema es inferior al 50%, se optó por implementarlo únicamente debido a las limitaciones financieras que implicaría un sistema más eficiente. Por lo tanto, el sedimentador primario de alta tasa presenta limitaciones en la eficiencia de remoción de carga orgánica por las razones expuestas (Ingeniería Total, 2007).

2 Justificación

Para el cumplimiento de la Resolución 631 de 2015 es necesario el estudio, evaluación e implementación de tratamientos que reduzcan la concentración de la materia orgánica presente en las ARD, la cual es causante de contaminación, problemas de salud y afecta la calidad de vida de los habitantes.

Por lo anterior, es de gran interés contribuir a la resolución de dichos problemas mediante tecnologías como lo es el tratamiento biológico de los lodos activados, a través del uso y evaluación de un reactor de mezcla completa operando en modo continuo a escala laboratorio con agua residual real tomada de la PTAR del municipio de Andes, Suroeste del departamento de Antioquia. Por lo tanto, el tratamiento servirá como propuesta para la implementación de un sistema biológico de lodos activados a escala real para alcanzar porcentajes de remoción considerables en las ARD de la PTAR, y de esta manera, cumplir con los valores límites máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015).

Tomando como referencia el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, una sedimentación primaria alcanza una eficiencia de remoción de DQO de 40%. Con la implementación de un tratamiento secundario de lodos activados, bajo operaciones óptimas, se obtendría hasta un 80% de remoción para el parámetro fisicoquímico evaluado (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). Por consiguiente, esta alternativa se plantea con el objetivo de mejorar el tratamiento de las ARD de la PTAR del municipio.

Este trabajo busca responder a las demandas de transformación y mejoramiento de la sociedad mediante intervenciones y aportes desde la administración aplicada al desarrollo humano social sostenible a partir de la solución de problemas de salud ambiental y salud pública como son las aguas residuales. Así, se desarrolla esta aplicación que ayudará a proteger y promover la salud y sus determinantes como los factores ambientales y servicios sanitarios (tratamiento, saneamiento básico) para la sociedad (territorio) y sus recursos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un tratamiento secundario de lodos activados a escala laboratorio en las aguas residuales domésticas de la PTAR del municipio de Andes, Suroeste antioqueño.

3.2 Objetivos específicos

- Examinar las características fisicoquímicas de los lodos de sedimentación primaria y del agua residual de la PTAR del municipio de Andes, Suroeste antioqueño.
- Realizar la implementación a escala laboratorio de un reactor de mezcla completa con lodos activados, utilizando las aguas residuales domésticas y los lodos de la sedimentación primaria de la PTAR del municipio de Andes, Suroeste antioqueño.
- Determinar la eficiencia del tratamiento secundario de lodos activados a escala laboratorio en la remoción de la carga contaminante presente en las aguas residuales domésticas de la PTAR del municipio de Andes, Suroeste antioqueño.

4 Hipótesis

La implementación a escala laboratorio de un reactor continuo de mezcla completa por aireación artificial con un sedimentador secundario incorporado y mediante lodos activados, permitirá obtener una alta eficiencia en términos de remoción de carga contaminante, que es efectuada por microorganismos capaces de metabolizar la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual doméstica, usando lodos sedimentados del tratamiento primario del mismo sitio de origen del agua. De esta manera, se logrará tratar el agua residual efluente de la PTAR y se alcanzará el cumplimiento de los valores límites máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de aguas superficiales establecidos en la Resolución 631 de 2015.

5 Marco teórico

Las aguas residuales son aquellas que se originan de las actividades diarias del ser humano que se descargan a través de un sistema de alcantarillado o directamente al medio ambiente (Osorio- Rivera et al., 2020). Su composición varía considerablemente, de acuerdo con sus fuentes contaminantes: doméstica, industrial, agrícola y pecuaria. En general, los principales contaminantes que componen las aguas residuales son materia orgánica, agroquímicos, pesticidas, metales pesados, etc. (Hincapié-Pérez & Chaverra-Cardona, 2015) y microorganismos tales como bacterias, protozoos y metazoos (animales pequeños como rotíferos, gusanos y larvas) (González-Leal, 2012).

De este modo, las aguas residuales se clasifican según su origen de la siguiente manera: domésticas (ARD) procedentes de servicios sanitarios, de duchas y lavamanos, de cocina y de pocetas de lavado; y no domésticas (ArnD) de actividades industriales, comerciales y las distintas a las domésticas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015).

Según Osorio y colaboradores (Osorio- Rivera et al., 2020), la composición de las aguas residuales domésticas se caracteriza de la siguiente manera:

- Física: temperatura, color, turbidez, pH, sólidos y olor.
- Química: proteínas, carbohidratos, cloruros, nitratos, fósforo, sulfatos y metales pesados.
- Biológica: bacterias, virus, alga y formas parasitarias.

Por su parte, el tratamiento de las aguas residuales se realiza con el propósito de reducir la carga contaminante a los cuerpos de aguas receptores (mar, ríos, lagos) y proteger la salud pública y el medio ambiente (Milena & Isabel, 2013). Actualmente, existen diferentes métodos de tratamiento que en síntesis tienen como finalidad la remoción de carga orgánica mediante la aplicación de principios físicos, químicos y biológicos. Dichos métodos se definen por etapas de tratamiento de la siguiente manera, según (Rodríguez, 2020):

- Tratamiento preliminar para la eliminación de sólidos de mayor tamaño que afectarían los procesos y el funcionamiento de la planta.
- Tratamiento primario para la remoción por medios físicos o mecánicos del material sedimentable o flotante.

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TRATAMIENTO SECUNDARIO DE ...

- Tratamiento secundario con la ayuda de la actividad biológica.
- Tratamiento terciario para el complemento de las etapas anteriores y se usan procesos de filtración que retiene materia en suspensión y químicos para la desinfección y eliminación de microorganismos patógenos.

A continuación, en la Tabla 1, se indica la eficiencia de los principales tratamientos para la remoción de la carga contaminante de las aguas residuales.

Tabla 1 Eficiencias de los procesos de tratamiento de aguas residuales

	Unidades de tratamiento	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes (%)						Observaciones
		DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y Aceites	Patógenos	
Pretratamiento	Cribado o desbaste	0-15	0-10	10-50	0-6	0-40	NA	Remociones con militamices y microcribas
	Desarenadores	0-5	0-5	0-10	NA	NA	NA	
	Trampa de grasas	0-5	0-3	10-15	NA	85-95	NA	
Tratamiento primario	Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	75-85	60-70	30-50	
	Lagunas anaerobias	50-70	30-50	50-60	75-85	80-90	80-90	
	Tanque Imhoff	25-40	15-30	50-70	75-85	60-70	30-50	
Tratamiento secundario	Reactor UASB (RAFA)	65-80	60-80	60-70	NA	NA	20-40	
	Lagunas facultativas	80-90	40-50	63-75	75-85	70-90	80-90	Sin contar con algas
	Lagunas aireadas	80-95	60-70	NA	NA	NA	80-90	Con sedimentación secundaria
	Reactor anaerobio RAP	65-80	60-80	60-70	NA	NA	20-40	
	Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	NA	NA	20-40	
	Lodos activados (convencionales)	80-95	70-80	80-90	NA	NA	80-90	
	Filtros percoladores de alta tasa, roca de alta tasa, plástico	65-90 75-95	55-70 60-80	60-85 65-85	NA	NA	80-90 80-90	
Desinfección	Rayos UV	NA	NA	NA	NA	NA	100	
	Cloración	NA	NA	NA	NA	NA	100	
	Laguna de maduración	NA	NA	NA	NA	NA	99,9	

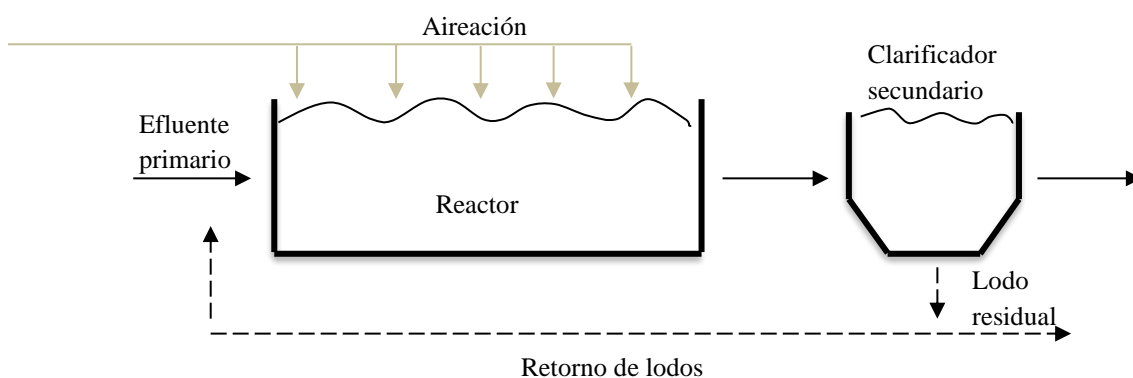
Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Conforme a ello, el tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en la capacidad que tienen los microorganismos para degradar la materia orgánica. Los lodos activados son utilizados para tratar aguas residuales domésticas. Su composición básica es una masa con alta carga de microorganismos y materia orgánica (Cuadrado & Cuartas, 2019).

Los lodos activados consisten en un método de tratamiento de ARD que emplea una suspensión de microorganismos los cuales se encargan de disolver materia orgánica, convirtiéndola en productos más simples (Caravali Lasso et al., 2017). El proceso consiste en un reactor de aireación, uno de sedimentación y un sistema de recirculación y eliminación de lodos (Ramos, 2017). Dicha aireación se logra gracias a difusores permitiendo una completa mezcla de sólidos, oxígeno disuelto y biomasa en todo el reactor. A su vez, el sedimentador secundario favorece el retorno de lodos al tanque de aireación con el fin de mantener una concentración constante (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017). En la Figura 1 se presenta un esquema simplificado de este proceso.

Los microorganismos consumen sustrato (materia orgánica e inorgánica) como fuente de energía en presencia de oxígeno. Con la edad de los lodos, la materia orgánica disminuye transformándose en nuevas células, gases y otros productos, denominándose esta reacción como oxidación biológica (La_Iglesia, 2016). Durante el proceso se forman unos flóculos, que son un agregado de microorganismos y partículas de materia orgánica e inorgánica para un mayor aprovechamiento del sustrato (Balcárcel G. et al., 2014) que se sedimentan en un tanque de sedimentación, en el cual son recirculados al tanque de aireación para mantener enriquecido el sistema (Lopez, A.;Cabrera, M.;Carrillo, 2017).

Figura 1 Esquema del proceso de lodos activados convencional



Fuente: (Ramos, 2017).

Para implementar el método de tratamiento de lodos activados es necesario que el agua residual a tratar tenga una remoción previa de arena, sólidos gruesos, grasas y aceites, en un tratamiento preliminar y primario. A su vez, se requiere un tanque de aireación para garantizar las concentraciones óptimas de Oxígeno Disuelto igual o mayor de 2,0 mg/L (Balcárcel G. et al., 2014) y un tanque de sedimentación que tiene como objeto separar el lodo activado de las

aguas residuales depuradas biológicamente (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

Por otro lado, los modelos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas a escala son utilizados con la finalidad de obtener parámetros para la realización de diseños y operación de sistemas de tratamiento, en vista de que a escala mayor presentan inconvenientes por errores en diseños basados en parámetros que no corresponden a las características fisicoquímicas y condiciones ambientales del efluente (Castillo Reinoso et al., 2020).

Para el diseño, operación y manejo de una planta de tratamiento de aguas residuales, se requiere de una evaluación de la calidad de las aguas residuales. Para ello, según (Hincapié-Pérez & Chaverra-Cardona, 2015) los principales parámetros a monitorear son los siguientes:

- Sólidos Suspendidos Totales (SST): compuestos por partículas orgánicas e inorgánicas que se mantienen en suspensión en el agua residual.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de la materia orgánica.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar biológicamente la materia orgánica. Como resultado, es la cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable durante 5 días y a 20°C.
- Compuestos de Nitrógeno y Fósforo: corresponde a la cantidad de estos compuestos e indican la degradación de materia orgánica presente en las aguas residuales. Exceso de estos provoca eutrofización.
- Oxígeno disuelto: cantidad de oxígeno que está disuelto en el cuerpo de agua, siendo un indicador de capacidad para mantener vida acuática.

Para tal razón, en la Tabla 2 se plasman los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles del agua residual doméstica que contempla la Resolución 631 de 2015. Estos valores establecen los límites que se deben cumplir quienes realizan vertimientos puntuales de residuos líquidos domésticos, industriales, comerciales y/o de servicios a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Según datos revelados por la Empresa Prestadora, la PTAR para el año 2022 vertió ARD con una carga de 106.707,75 KgDBO₅/Año (Gutiérrez, J., comunicación personal, 28 de abril de 2022). Siendo este un dato relevante para clasificar el tipo de generador y los valores límites máximos permisibles para evaluar, dando como resultado una carga de 296,41 KgDBO₅/día.

Tabla 2 *Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles*

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD) DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD), Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD – ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES, CON UNA CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 kg/DÍA DBO5
Generales			
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O2	200,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O2		90,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	100,00	90,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00	20,00
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo			
Ortofosfatos (P-PO43-)	mg/L		Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L		Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno			
Nitratos (N-NO3-)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L		Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L		Análisis y Reporte

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015).

Por otro lado, se encuentran los manuales, procedimientos y estándares para determinar parámetros de control para una operación adecuada del tratamiento y su eficiencia. Entre ellos, Oxígeno Disuelto (OD), Índice Volumétrico de Lodos (IVL), Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor de Mezcla (SSVLM) y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) (APHA, 2012) y metodologías para el seguimiento e identificación de microorganismos propios del sistema como indicadores de edad y operación, tales como protozoos y bacterias (Quick Determination of Filamentous Microorganisms in Activated Sludge, 1999; Díaz Fulgan, 2014; Eikelboom, 2000; González-Leal, 2012).

A continuación, en la Tabla 3, se presenta un resumen de los principales sistemas biológicos en Colombia y su porcentaje de eficiencia de remoción, de acuerdo con una revisión sistemática.

Tabla 3 Principales sistemas de procesos biológicos en Colombia

Autor (es)	Sistema de Tratamiento de ARD	Porcentajes de Remoción					
		DBO5	DQO	SST	NT	PT	S
González y Saldarriaga (2008).	Tipo A2O (anaerobio-anóxico-aerobio)	92,5%	NA		87,7%	83,5%	
Méndez, Carreño y Hernández (2011)	Lagunas de estabilización	80,0%	≤80%				
Torres (2011)	Lodos activados combinado con sistema de Biodiscos	≤80%	≤80%	≤80%			
Correa, Cuervo, Mejía y Aguirre (2012)	Laguna anaerobia, conectada en serie con dos lagunas facultativas, operando en paralelo	90,0%					
Mañunga, Rodríguez y Torres (2011).	Lodos activados	80,0%	76,0%	80,0%			
Orozco, Triviño y Manrique (2014).	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente	≤70%	≤80%				
Badejo, Omole, Ndambuki y Kupolati (2017).	Lodos activados combinado con una vegetación de cama de humedales artificiales sumergidos			99,6%	99,6%		88,8%
Martínez, García Martínez, Medina y Almela (2017).	Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal	97,8%	92,7%	97,5%	91,5%	96,9%	
Sanctisa, Moroa, Chimientia, Ritellia, Levantesib y Iaconia (2017).	Lotes secuenciales de sistemas lagunares	98,0%	90,0%	90,0%	80,0%	60,0%	

Fuente: (Vargas et al., 2020).

En el país, se encuentran sistemas aerobios, anaerobios, facultativos o la combinación de estos para la remoción de contaminantes presentes en las ARD (Vargas et al., 2020). De esta manera, se evidencia grandes eficiencias de remoción a través de procesos biológicos implementados para el tratamiento de aguas residuales en Colombia; por ejemplo, el uso de lodos activados presenta una eficiencia de hasta el 76% de DQO.

Marco normativo

Mediante el siguiente marco normativo, se evidencia el alcance, la naturaleza y cómo se regula el desarrollo de la investigación global y localmente.

Tabla 4 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel internacional

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Objetivos de Desarrollo Sostenible	Asamblea General de las Naciones Unidas 2015.	Plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos. Plantea una misión ambiciosa, pero viable, para los dos próximos decenios.	Objetivo 6 “Agua limpia y saneamiento”. “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”.
Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	American Public Health Association.	Standard Methods ha incluido cientos de técnicas analíticas para la determinación de la calidad del agua.	Methods B. 1060 toma de muestras. 2540 sólidos. 5220 DQO.

Tabla 5 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Plan Decenal de Salud Pública 2022-2031	Ministerio de Salud y Protección Social 2022.	Política pública que incluye la hoja de ruta que, a partir del consenso social y ciudadano, establece los objetivos, las metas y las estrategias para afrontar los desafíos en salud pública para los próximos 10 años.	Eje 2. Garantía de acceso a saneamiento básico y agua limpia. Línea de Acción 7. A 2031 Colombia aumentará el 34% de tratamiento seguro de aguas residuales urbanas domésticas (Línea de base: 54,3%. 2022).
Resolución 631 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2015.	Establece los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.	Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) y de las aguas residuales (ARD – ARnD).

Tabla 6 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Decreto 3930 de 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 2010.	Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.	Capítulo V De los criterios de calidad para destinación del recurso. Capítulo VI De los vertimientos. Capítulo VIII Del Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos.
Resolución 330 de 2017	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio 2017.	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo.	Anexo No. 2 Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico – RAS Título E - TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.
Decreto 2667 de 2012	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2012.	Reglamentar la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del recurso hídrico como receptor de vertimientos puntuales.	Capítulo IV Tarifa de la tasa retributiva por vertimientos puntuales.

Tabla 7 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel nacional

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Resolución 699 de 2021	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2021.	Establecer los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realicen vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas (ARD-T) al suelo.	Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARD-T al suelo.
Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 2002.	Contiene los elementos básicos que se deben tener en cuenta para el establecimiento y realización de programas de monitoreo de calidad del agua, y cubre los principales aspectos contenidos en el Decreto 3100 de octubre de 2003.	Selección del sitio de muestreo, medición de caudal, tipo de muestreo, aislamiento de equipos y materiales, y normas de seguridad, protección personal y salud.

Tabla 8 Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel departamental

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Plan de Desarrollo Departamental Unidos por la Vida 2020-2023	Gobernación de Antioquia 2020.	Plan de Desarrollo UNIDOS POR LA VIDA, que representa la convergencia y el compromiso de toda Antioquia para trabajar por nuestro futuro común.	Programa 5: Saneamiento para la protección del medio ambiente.

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN TRATAMIENTO SECUNDARIO DE ...

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
		La vida humana, nuestra comunidad y el territorio en el centro de la planeación, en un momento que nos plantea actuar y gestionar proyectos, obras y acciones que concreten oportunidades para transformar nuestros retos en realizaciones.	Alternativas de tratamiento de aguas residuales a nivel local o regional y construcción, mejoramiento, optimización y rehabilitación de plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en las zonas urbanas. Extender el plan hacia la ruralidad.

Tabla 9 *Marco normativo del alcance y naturaleza del trabajo a nivel departamental*

Ley, Decreto, Resolución, Acuerdo, Plan	Entidad quien expide y fecha de expedición	Objeto del marco	Secciones de interés
Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos Andes.	Ingeniería total - Servicios públicos S.A. ESP. 2007.	El PSMV plantea objetivos para saneamiento y vertimientos en el municipio. Se tiene en cuenta el diagnóstico del sistema de alcantarillado, las diferentes obras y proyectos del Plan Maestro de Alcantarillado.	Diagnóstico del Sistema de Alcantarillado y Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas.
Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023 “Alianza por el Desarrollo Humano”	Alcaldía de Andes 2020.	Plan con la visión de consolidar a Andes como el principal municipio del Suroeste antioqueño en lograr un territorio ambientalmente sostenible.	Optimización, mantenimiento y expansión de los sistemas de agua potable y saneamiento básico.

6 Metodología

6.1 Diseño y construcción del reactor de mezcla completa

En el presente estudio se realizó un diseño experimental exploratorio; es decir, se llevó a cabo una serie de pruebas y observaciones para explorar y obtener información sobre el tema de investigación. El objetivo principal fue establecer la relación causa-efecto de factores o variables sobre la eficiencia del tratamiento secundario de lodos activados. Se buscó determinar cómo la implementación de un reactor de mezcla completa como sistema secundario de lodos activados afectó en la eficiencia en la eliminación de materia orgánica en las aguas residuales domésticas de la PTAR.

El desarrollo del experimento se realizó de acuerdo con los objetivos planteados de la siguiente manera: el montaje del experimento se hizo en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad de Antioquia Seccional Suroeste. Allí también se evaluó la calidad del lodo y del agua residual. Las muestras de lodos y de agua residual se tomaron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del municipio de Andes.

Figura 2 Esquema del funcionamiento del sistema a escala laboratorio

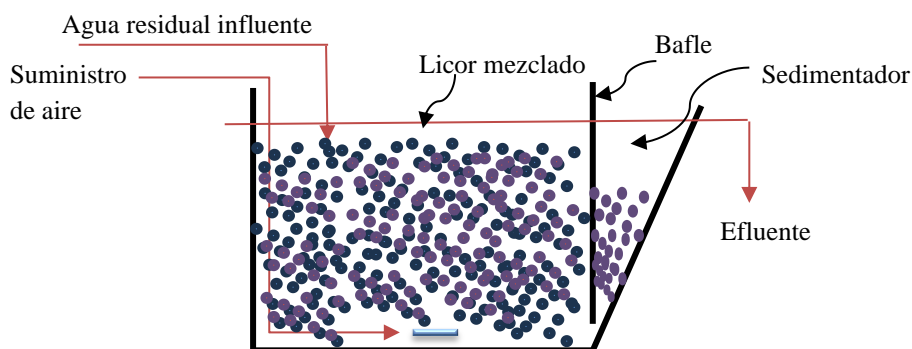


Se construyó un reactor continuo de mezcla completa a escala laboratorio que operó con un volumen efectivo de 12 litros de los cuales el 80% fue agua residual y el restante el lodo (Figuras 2 y 3). El volumen efectivo fue establecido para lograr un efluente a través de la válvula instalada, de los cuales, el inóculo que fue del 20%, se tomó para acondicionar la mayor cantidad de biomasa y lograr una mejor actividad microbiana con el volumen de ARD. Esta

mezcla de ARD y lodo, que fue el licor mezclado, inició con un acondicionamiento y activación con aireación. Este tipo de reactor tiene un flujo de entrada y de salida continuos con una válvula de PVC de ½” ensamblada para el efluente. Se fabricó en acrílico transparente, alimentado con bomba peristáltica BT100S Golander a 0,8, 1,0 y 2,8 revoluciones por minuto (RPM). La aireación se aplicó mediante bomba de aire (pecera) SOBO SB-648A y una manguera difusora de una longitud de 36” y 4 mm de diámetro elaborada de goma flexible y porosa de marca Jeneca para que se suministrara de manera homogénea y garantizara lodos en estado de mezcla con un caudal de 1L/44s de flujo de aire.

Las muestras puntuales de lodos se tomaron de los sólidos sedimentados de los sedimentadores y el agua residual del canal de salida de la planta de tratamiento primario de aguas residuales domésticas del municipio de Andes para el acondicionamiento del lodo y su posterior montaje experimental del sistema funcionando en modo continuo. De esta manera, el efluente de la planta fue el afluente del reactor. En vista de que el efluente de la PTAR no se pasa a ningún tipo de tratamiento secundario, se sometió al piloto diseñado en el estudio.

Figura 3 Esquema lodos activados a escala laboratorio



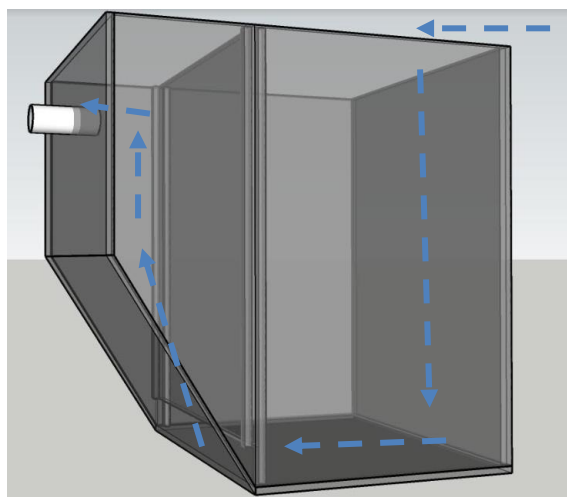
Fuente: (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017).

El reactor continuo de mezcla completa construido fue una adaptación de un diseño elaborado en la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, el cual es utilizado ampliamente como sistema de tratamiento biológico para aguas residuales; está conformado por dos unidades (Figura 3 y 4):

- Tanque de aireación completamente mezclado, debido a la aireación y/o agitación con agitadores difusores y en el cual ocurre la actividad bioquímica.
- Sedimentador secundario, en el que se retienen los SSV por sedimentación.

Los compartimentos se separaron con una compuerta del mismo material y con una ranura de 2,5 cm entre esta y el fondo del reactor. En el primero, se llevó a cabo la mezcla completa, y en el segundo, la sedimentación, en el cual se acumularon los lodos en la parte baja del sedimentador, regresaron a la unidad de reacción a través de la ranura para mantener constante la concentración de biomasa (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017). Es decir, los lodos de sedimentación y por un flujo lento del efluente, se sedimentaron a través de la geometría del segundo compartimento y por gravedad para lograr una recirculación al compartimento de la biorreacción por medio de la ranura existente del baffle.

Figura 4 Esquema del reactor de mezcla completa a escala laboratorio para funcionar de forma continua



La experimentación se realizó de acuerdo con los objetivos planteados para contrastar la hipótesis de la investigación y se analizó el comportamiento de variables fisicoquímicas y los efectos observados sobre las variables de desempeño del sistema.

6.2 Muestreo del agua residual y lodos de sedimentación primaria

Se tomaron muestras compuestas de agua residual y muestras compuestas de lodo de la PTAR para dar inicio al montaje en lote del licor mezclado completamente (lodo más agua residual). Las muestras de lodo y agua se recolectaron en horarios de la mañana, medio día y en la tarde para que fuese más homogénea de acuerdo con la actividad poblacional y los residuos líquidos generados, de acuerdo con los caudales de entrada y de salida de la planta para un total de 6 muestras. Para esto, se utilizaron recipientes tapa rosca (Schott) que se transportaron en

condiciones de refrigeración al laboratorio. El muestreo se realizó en la cámara de purga de lodos de los tanques de sedimentación de la PTAR y el efluente de esta (Figura 5).

Para el cálculo del volumen de la muestra compuesta se hizo uso de la siguiente ecuación:

Ecuación 1 *Volumen de cada alícuota para muestreo compuesto*

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p * n}$$

Donde:

V_i : Volumen de cada alícuota.

V : Volumen total a componer (2,5 litros de ARD y 2,0 litros de lodo).

Q_i : Caudal instantáneo de cada muestra.

n : Número de muestras tomadas.

Q_p : Caudal promedio durante el muestreo.

Fuente: (IDEAM, 2002).

Figura 5 (A) Toma de agua residual en efluente de PTAR (B) Toma de lodo (purga de sedimentadores)



Para el análisis de calidad del lodo se empleó el método de Sedimentabilidad de acuerdo con el método 2710 E (APHA, 2012) haciendo uso de una probeta graduada de 1L, al cual se le agregó 1L del lodo sedimentado como se presenta en la Figura 6. Se realizó por duplicado. Las muestras se agitaron y se dejaron en reposo. A continuación, se hizo seguimiento a la altura de la interfase lodo-clarificado vs el tiempo.

Para el IVL se utilizó el mismo método de sedimentabilidad, registrando el volumen de biomasa de 30 minutos de sedimentación (APHA, 2012). Además, se determinaron los SST en laboratorio.

EL IVL se calcula utilizando la Ecuación 2:

Ecuación 2 Índice Volumétrico de Lodos

$$IVL = \frac{V. \text{ lodos (ml)}}{C. \text{ SST (g/L)} \times V. \text{ probeta (L)}}$$

Donde:

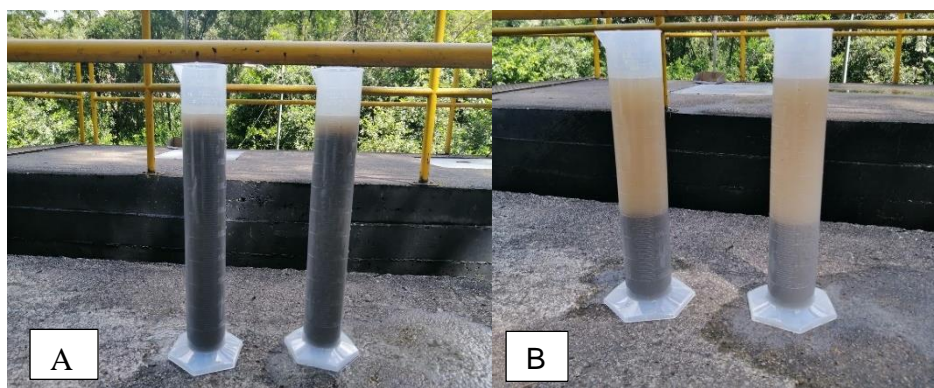
V. lodos: Volumen ocupado por los lodos después de 30 minutos de sedimentación (ml).

C. SST: Concentración de SST (g/L).

V. Probeta: Volumen de la probeta (L)

Fuente: (APHA, 2012).

Figura 6 (A) Prueba de velocidad de sedimentación e IVL tiempo cero. (B) Prueba de velocidad de sedimentación e IVL 30 minutos.



Para la determinación de Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los Sólidos Sedimentables (SSED) contenidos en el agua residual, se siguió el protocolo *Methods B* del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Todos los análisis de sólidos se realizaron por duplicado.

Para los primeros, se tomó un volumen de 100 ml de muestra de ARD bien mezclada y se llevó a una cápsula de porcelana previamente secada y pesada a 103-105°C en una estufa hasta evaporación; la diferencia de peso representó los ST.

Para el análisis de los SST se emplearon filtros de fibra de vidrio GC-50 Advantec con tamaño de poros de 0,45 μm previamente secados. Para llevar a cabo el procedimiento, se agitó la muestra y se filtraron 50 ml de ARD y 10 ml de lodo usando un equipo de filtración Advantec de polisulfona y una bomba de vacío Ilmvac. Luego se removió el filtro cuidadosamente con pinzas, se secó en horno por una hora a 103 °C, se dejó enfriar hasta temperatura ambiente en desecador y se pesó de nuevo. La diferencia de peso representó los SST. Finalmente, para los SSED se sedimentaron en un recipiente en forma de cono (Imhoff) durante un periodo de 60 minutos 1 litro de ARD y 1 litro de lodo.

Para el agua residual efluente de la planta y el lodo, se midieron también algunos parámetros *In Situ* como OD, pH y temperatura mediante un multiparámetro 3510 IDS WTW con diferentes sondas para los parámetros mencionados.

6.3 Puesta en marcha del montaje experimental

Se inició con un montaje en lote para el acondicionamiento del inóculo (Figura 7), luego un montaje en continuo con 3 caudales (Q) y Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) diferentes: 2,4 ml/min, 2,9 ml/min y 8,2 ml/min; y 3,5 días, 2,9 días y 1,0 días respectivamente. Para cada uno de los caudales, el reactor se alimentó con agua residual de la PTAR realizando la respectiva toma de muestra y se garantizó un tratamiento constante durante los tiempos de evaluación.

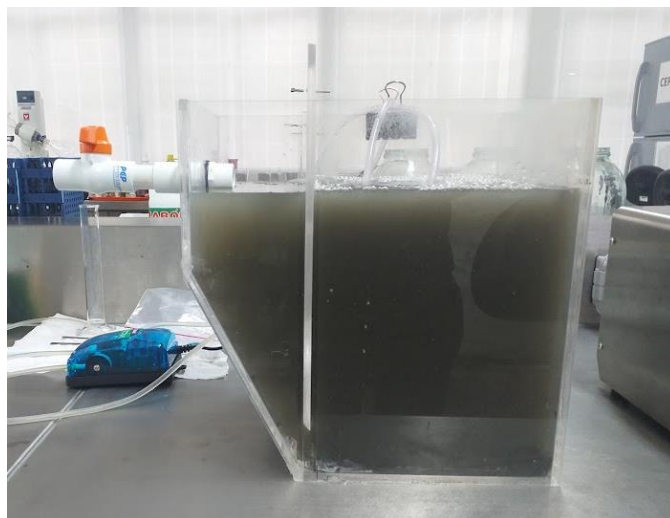
6.4.1 Acondicionamiento del lodo

El inóculo usado (lodo de la PTAR) para su activación tomó seis días con una puesta en marcha del sistema en lote más aireación, en el cual se monitoreó y se evaluó diariamente la DQO, pH, OD, temperatura y color como indicador organoléptico.

Inicialmente, el sistema permaneció ocho días en proceso en lote para la activación del inóculo, durante el cual se tomó lectura de los parámetros mencionados (Figura 7). La DQO se realizó diariamente al LMC. Tomando la información brindada por la Empresa Prestadora, la PTAR para el año 2022 vertió ARD con una carga de 296,41 KgDBO₅/día (Gutiérrez, J., comunicación personal, 28 de abril de 2022); siendo este un dato relevante para clasificar el

tipo de generador y tomar como referencia el valor límite máximo permisible de la DQO de 180 mg/L de O₂ como indicador de activación del inóculo.

Figura 7 Acondicionamiento del inóculo - proceso en lote



6.4.2 Montaje experimental del sistema completo funcionando en modo continuo

Se comenzó a operar el sistema con la bomba peristáltica a 0,8 (RPM) equivalente a un caudal de alimentación del reactor de 2,4 mL/min. Mediante el método volumétrico, se determinaron los caudales empleando una probeta y un cronómetro (IDEAM, 2002). De esta manera, se calculó el TRH con la Ecuación 3 donde usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017). Por lo tanto, el Volumen efectivo del reactor de 12L fue dividido entre el caudal, para un valor de 3,47 días de TRH. Cada montaje con los Q diferentes 2,4, 2,9 y 8,2 ml/min permaneció 12, 11 y 13 días respectivamente y se monitorearon aleatoriamente durante ese tiempo para cada uno de los parámetros evaluados.

Ecuación 3 *Tiempo de Retención Hidráulica*

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

V=Volumen del reactor.

Q= Caudal.

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017).

La caracterización se realizó antes (afluente) y después (efluente) del tratamiento de lodos activados para cada Q. Los parámetros fisicoquímicos medidos fueron OD, pH, Temperatura, DQO, ST, SST de las dos aguas y Sedimentables del LMC, se determinaron con base a los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales (APHA, 2012) y las guías del IDEAM (IDEAM, 2002) y se consideró la norma vigente para Colombia la Resolución 631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015).

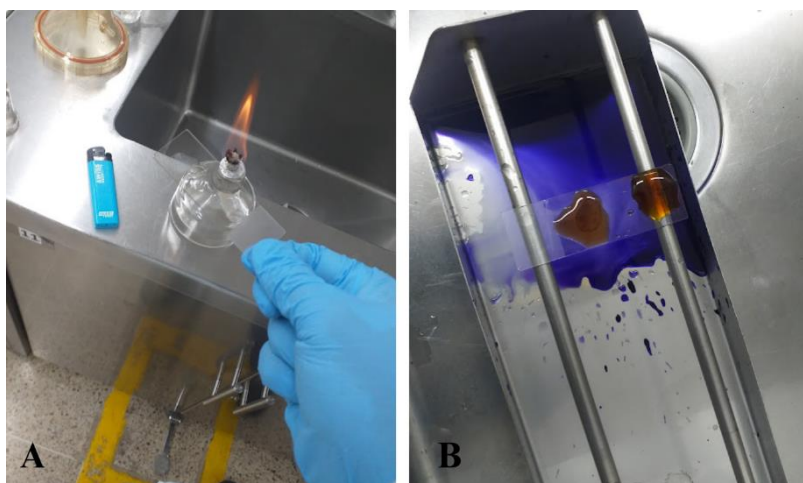
Figura 8 *Montaje experimental completo del sistema funcionando en modo continuo*



Para la caracterización microbiológica del licor de mezcla, los microorganismos a identificar fueron bacterias filamentosas, protozoos, rotíferos, nemátodos y algas. Se hizo uso de un microscopio óptico binocular Optika B352PL. El procedimiento se llevó a cabo en los días en que se caracterizaron los parámetros fisicoquímicos para apreciar unos u otros tipos de microorganismos; es decir, las etapas de colonización en las cuales los organismos alcanzaron su número máximo de acuerdo con la edad del lodo en aireación. (González-Leal, 2012).

Para la identificación de protozoos, se hizo en muestras en fresco y coloración Verde de Metil-Acético y Lugol y para las bacterias filamentosas muestras en fresco y coloración de Gram, Neisser y PHB, y siguiendo información morfológica e ilustraciones de microorganismos más frecuentes en un proceso biológico (Quick Determination of Filamentous Microorganisms in Activated Sludge, 1999; Díaz Fulgan, 2014; Eikelboom, 2000; González-Leal, 2012). Se tomó 0,05 ml de muestra (1 gota) con pipeta pasteur, se dispuso en portaobjeto, se realizó la respectiva coloración y se observó en 40 y 100X. Todas las muestras se analizaron por duplicado.

Figura 9 Procedimiento Tinciones Microbiológicas



(A) Fijación de la muestra y (B) Aplicación de Lugol sobre la muestra fija.

La caracterización del flóculo se hizo con muestra homogenizada en fresco para cada uno de los tres caudales. Se tomó con pipeta pasteur 0,05 mL, se montó en placa portaobjeto y se examinó en microscopio a 40 y 100X las características de los flóculos en cuanto a forma (redondo, irregular) y estructura (compacto, abierto).

La determinación de DQO se llevó a cabo mediante el método reflujó cerrado-colorímetro que consiste en la oxidación de la materia orgánica e inorgánica por adición de dicromato de potasio y ácido sulfúrico mediante el uso de un Termorreactor Nanocolor Vario C2. Con el espectrofotómetro UV-Visible Thermo Scientific Genesys 180 se determinó la concentración en mg/L a partir de la ecuación de la línea recta DQO (Ecuación 4), donde Y fue la absorbancia leída en el equipo (APHA, 2012). Se tomó un blanco con agua destilada y muestras por duplicado en el afluente y efluente del reactor. Dado que la DQO a diferencia de la DBO₅ puede ser calculado en un menor tiempo, se escogió como parámetro para medir la cantidad de sustrato y para la obtención de los datos que determinarían la eficiencia del

tratamiento (Ramos, 2017). Según los valores no mostrados por su naturaleza privada de la empresa prestadora, se calculó la relación indirecta de la DBO₅ respecto al efluente de la PTAR y la del reactor del estudio, siendo la DBO₅ = 0,7·DQO (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017).

Ecuación 4 *Ecuación de la línea recta para calcular DQO*

$$y = 0,000322\text{ppm DQO} - 0,00676$$

Fuente: (APHA, 2012).

6.5 Evaluación de la eficiencia del sistema

Mediante la Ecuación 5 y con los datos obtenidos en la determinación de la DQO para los diferentes caudales, se halló el porcentaje de eficiencia para cada uno. Esta es una relación entre la concentración removida y la del afluente. Se expresa en porcentaje (Cuadrado & Cuartas, 2019).

Ecuación 5 *Eficiencia del Sistema*

$$E = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$$

Donde:

E= Eficiencia del proceso (%)

S_o = Valor del parámetro en el afluente

S= Valor del parámetro en el efluente

Fuente: (Cuadrado & Cuartas, 2019).

6.6 Análisis estadístico de los datos

De acuerdo con los objetivos planteados y el montaje experimental, para contrastar la hipótesis de la investigación se analizó el comportamiento de variables fisicoquímicas y los efectos observados sobre las variables de desempeño del sistema. Para ello, se emplearon herramientas de estadística descriptiva: media y desviación estándar. La sistematización de datos se ordenó a través de Microsoft Excel Versión 2304.

Se realizó un análisis comparativo de la calidad del ARD y sus variables fueron: pH, Temperatura, OD, DQO y Sólidos, con la línea base (diseño estable y sin tratamiento) y la aplicación de los lodos activados.

Para el desarrollo del trabajo se definieron las unidades de análisis que dieron atributos que podrían variar entre ellos y que son importantes para resolver el problema de investigación. Fueron medibles y se analizaron siendo variables de estudio de naturaleza cuantitativa con escalas de medición continua (números reales, con decimales); a su vez, estas variables fueron de intervalos, en vista de que el cero es un valor que puede tomar y ser un indicativo a su vez de magnitud. La representación gráfica de los resultados se mostró tanto en gráficos como en tablas.

6.7 Aspectos éticos

La investigación se realizó con el compromiso de los preceptos establecidos en el Código de Ética en Investigación de la Universidad de Antioquia, haciendo énfasis en “difusión de hallazgos de la investigación de manera abierta, completa, oportuna y razonable a la comunidad científica y a la sociedad en general, sin perjuicio de observar la debida reserva frente a información confidencial” (Velásquez Escobar et al., 2015). Por ende, se tuvo un compromiso de confiabilidad de la información relevante que comprometiera al funcionamiento y operación de la PTAR y la Empresa. Estos asuntos fueron dialogados con la gerencia y dirección de la Empresa de Servicios Públicos de Andes.

Como proceso de retroalimentación del estudio, se realizó la socialización de los resultados del piloto con el gerente, personal administrativo y operativo de la Empresa y con el acompañamiento de la directora de la Universidad de Antioquia Seccional Suroeste, con el objetivo de dar a conocer una de las posibles alternativas de tratamiento secundario para reducir la carga contaminante vertida de la PTAR.

7 Resultados

7.1 Muestreo y caracterización del agua residual y lodos de sedimentación primaria

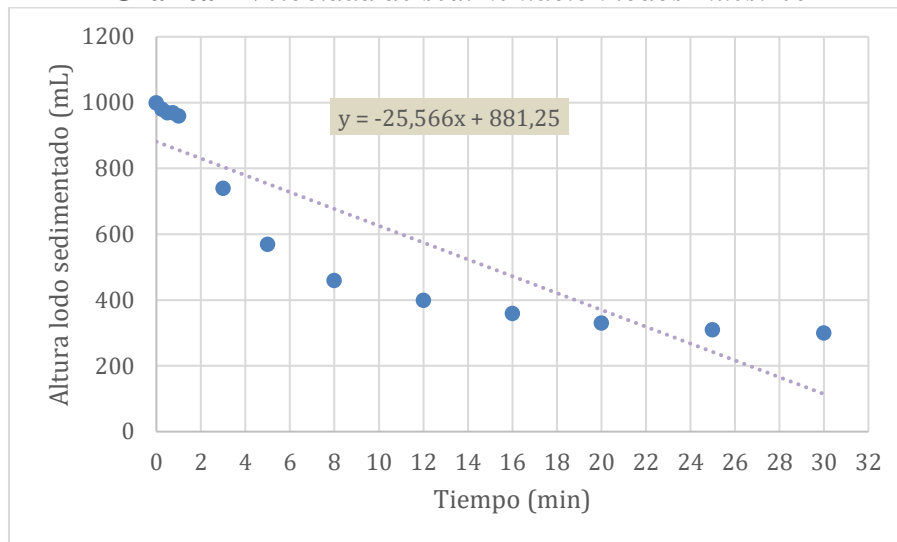
Los datos obtenidos de la Velocidad de Sedimentación se presentan en Tabla 10 y en la Gráfica 1. Se trazó una tangente a la zona de la curva con mayor pendiente, la cual representó la velocidad de sedimentación (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017).

Tabla 10 *Velocidad de sedimentación lodos muestreo*

Velocidad de sedimentación VLS (g/mL 30 min)	
Tiempo (min)	H interfase lodo sedimentado (ml)
0	1000
0,25	980
0,5	970
0,75	970
1	960
3	740
5	570
8	460
12	400
16	360
20	330
25	310
30	300

En los primeros 8 minutos se observó una mayor sedimentación, permitiendo en el siguiente tiempo que esa materia en suspensión que estuvo más cerca en términos de altura, se sedimentara masivamente, tal como se muestra en la Gráfica 1. Siendo la H de interfase la altura del lodo sedimentado.

Gráfica 1 *Velocidad de sedimentación lodos muestreo*



Calculando la pendiente se determinó la velocidad de sedimentación. Como resultado, se obtuvo que el lodo de la planta presentó una velocidad de sedimentación de 25,6 g/mL/min.

Para el IVL se alcanzaron los siguientes datos:

V. lodos: 300 mL

C.SST: 3,780 g/L

V. Probeta: 1L

Obteniendo de esta manera **79,4 mL/g** para el lodo de la sedimentación primaria de la planta. A partir del IVL obtenido se pudo clasificar el grado de sedimentabilidad de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 11 *Relación IVL y grado de sedimentabilidad*

IVL	Grado de sedimentabilidad
0-100	Muy bueno
100-200	Adecuado
>200	Pobre

Fuente: (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017).

Por lo tanto, los lodos del tratamiento primario de la planta presentaron una buena sedimentación y compactación de la biomasa necesaria para el tratamiento evaluado.

Por otro lado, se presentaron los siguientes resultados del análisis de ST y SST del agua residual y SST y SSED del lodo de la PTAR.

Tabla 12 Resultados parámetros muestreo

Parámetro	Unidades	Resultados	VLMP*
ST efluente	mgST/L	556,5	NA
SST efluente	mgSST/L	183	90,0
Sedimentables efluente	mLSSED/L-h	<0,1	5,0
Oxígeno efluente	Disuelto mg/L O ₂	0,2	NA
pH efluente	Unidades de pH	7,0	6,0 a 9,0
Temperatura efluente	°C	23	NA
pH Lodos	Unidades de pH	6,3	NA
Temperatura Lodos	°C	23,1	NA
SST lodos	mgSST/L	3780	NA
Sedimentables lodos	mlSSed/L-h	162,5	NA

*Valor límite máximo permisible de la Resolución 631 de 2015-Generador de 625Kg/día de DBO₅.

Como se puede apreciar en la Tabla 12, existe una alta carga en suspensión que sobrepasa el valor límite permisible de 90 mg/L SST en la respectiva normatividad de aguas residuales, siendo uno de los principales responsables de la turbiedad en la muestra de agua tomada. Además, considerando los SSED, que son esos sólidos que se desprenden de esa suspensión, permitieron también corroborar la alta carga. Así mismo, la temperatura y el pH del ARD y del lodo no presentaron diferencias altas, por lo que fueron parámetros de control que garantizaron un ambiente idóneo para los microorganismos aerobios, actores principales del tratamiento aplicado.

7.2 Acondicionamiento del lodo

El sistema en proceso en lote para el acondicionamiento del inóculo permaneció ocho días para su activación. Se observó que al sexto día se logró remover un 40% de la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas; por lo que se obtuvo un valor de 160,7 mg/L de O₂ para DQO. Este valor se encontró por debajo del límite máximo permisible de 180 mg/L de O₂

establecido en la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2015). Con esta concentración alcanzada de 160, mg/L de O₂, se determinó la activación del lodo teniendo como criterio técnico el valor máximo permisible establecido en la norma para proceder al tratamiento en continuo.

Gráfica 2 Comportamiento de variables en función del tiempo -Activación Inóculo-
Funcionamiento en lote

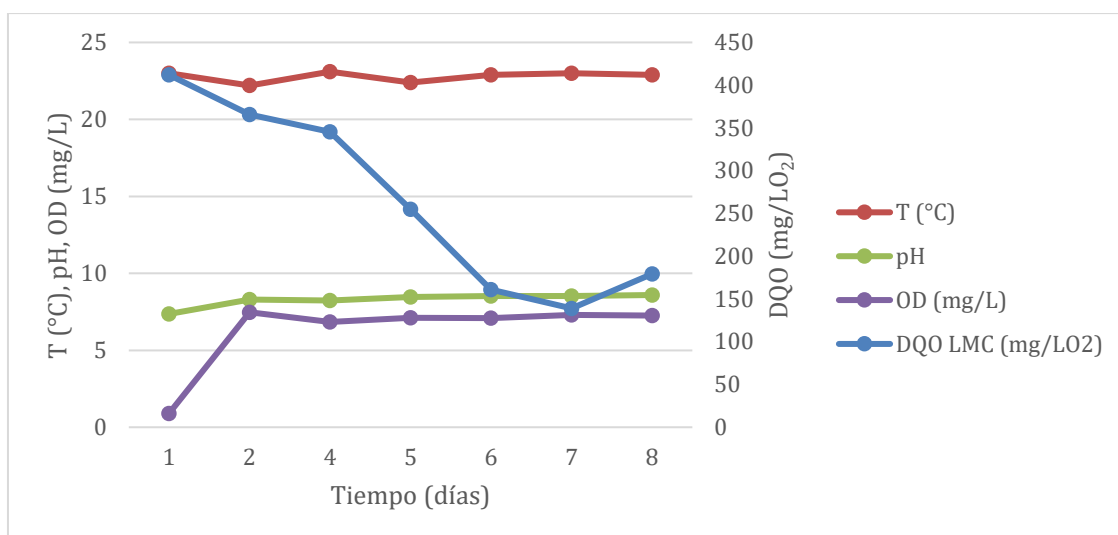


Tabla 13 Comportamiento de variables en función del tiempo -Activación Inóculo-
Funcionamiento en lote

DÍA	DQO LMC (mg/LO ₂)	T (°C)	pH	OD (mg/L)
1	412,0	23,0	7,4	0,9
2	365,7	22,2	8,3	7,5
4	345,5	23,1	8,2	6,9
5	255,0	22,4	8,5	7,1
6	160,7	22,9	8,5	7,1
7	139,0	23,0	8,5	7,3
8	179,3	22,9	8,6	7,3
Media	265,3	22,8	8,3	6,3
Desviación Estándar	101,7	0,3	0,4	2,2

Después de la caracterización inicial del agua residual y del lodo de la PTAR presentada (Gráfica 2 y Tabla 13), estaban dadas las condiciones adecuadas para garantizar un ambiente óptimo para el desarrollo de microorganismos y, por ende, la remoción del sustrato que se encontraba en mezcla completa. El OD siendo un elemento primordial para un sistema aerobio,

estuvo estable a diferencia de la primera lectura que se realizó, en vista de que se tomó inmediatamente cuando el sistema operó en lote. De la misma manera, el pH tuvo un comportamiento similar por las mismas condiciones de la lectura en que se realizó. El LMC presentó una concentración entre 163,6 y 367,0 mg/L de O₂ en términos de DQO, de acuerdo con su media y desviación estándar.

7.3 Montaje experimental del sistema completo funcionando en modo continuo

Después de la fase de activación del inóculo, la experimentación se realizó con tres niveles diferentes de operación de la bomba de alimentación. Mediante el método volumétrico, se determinaron los caudales y, por ende, los TRH. Inicialmente, la alimentación fue de 0,8 RPM en la bomba equivalente a un caudal de 2,4 mL/min. De esta manera, se calculó el TRH que es igual al Volumen efectivo 12 L dividido el caudal. En síntesis, los tres caudales operados presentaron eficiencias de 77, 79 y 75% en promedio en términos de DQO respectivamente, sin diferencias significativas. Las condiciones de tratamiento de pH, temperatura y OD fueron estables para cada uno, demostrando el origen doméstico del afluente del reactor y una buena remoción en de materia orgánica biodegradable.

Tabla 14 *Tiempos de Retención Hidráulica evaluados para el estudio*

Caudal (mL/min)	Duración (días)	TRH (días)
2,4	12	3,5
2,9	11	2,9
8,2	13	1,0

Para la primera evaluación con **Q₁=2,4 mL/min** se hizo seguimiento durante 12 días de manera aleatoria a los parámetros ST, SST y DQO a la entrada y salida del reactor. Además, se hizo seguimiento al OD, pH y Temperatura al afluente y efluente del reactor; dichos resultados se consignan a continuación:

Gráfica 3 Resultados de DQO con $Q_1=2,4$ mL/min

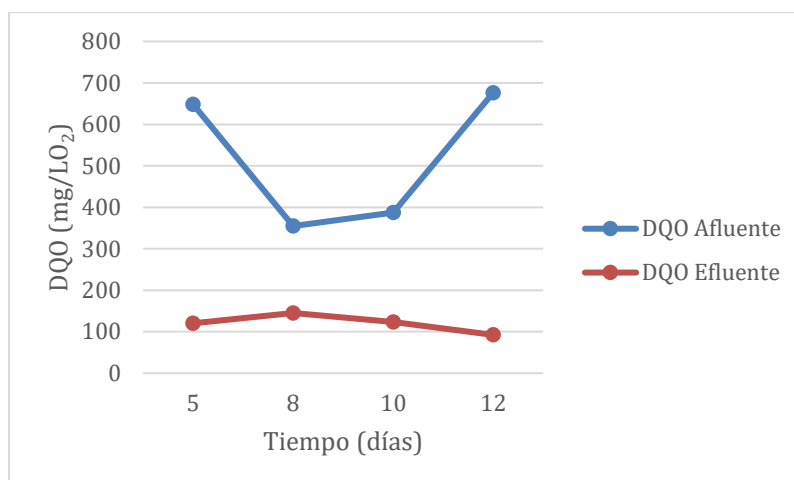


Tabla 15 Valores DQO y sus valores de porcentaje de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados

Día	DQO Afluente (mg/LO ₂)	DQO Efluente (mg/LO ₂)	%remoción
5	648,3	120,4	81%
8	354,8	145,2	59%
10	387,5	123,5	68%
12	676,3	92,4	86%
Media	516,7	120,4	
Desviación estándar	169,0	21,7	

Los cálculos presentados en la Gráfica 3 y en la Tabla 15 reflejaron un promedio de 120 mg/L de O₂ en el efluente que corresponde a una eficiencia de remoción del 77% aproximadamente en términos de DQO. Se evidenciaron unas concentraciones considerables en el efluente de la planta que, con el TRH y la operación del reactor, se removieron relativamente de una manera constante. Tomando como referencia la desviación estándar de 12%, se puede inferir que el rango de porcentajes de remoción de DQO en el proceso fue de 65 y 89%. También se evidenció una variación significativa en la DQO de entrada de los días 5 y 12 con respecto a los días 8 y 10. Además, se observó que el afluente presentó variación para la DQO debido a los caudales generados y la composición de las muestras compuestas.

Tabla 16 Valores de SST en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados

Día	Afluente SST (mg/L)	Efluente SST (mg/L)	%remoción
5	164,0	22,0	87%
8	156,0	11,0	93%
10	46,0	17,0	63%
12	141,0	7,0	95%
Media	126,8	14,3	
Desviación estándar	54,7	6,6	

Por otra parte, el tratamiento bajo el caudal propuesto alcanzó valores de remoción de SST del 95% evidenciando que en el efluente se presentaron concentraciones de 14,3 mg/L de SST en promedio y una variación considerable en el afluente demostrando las curvas de caudales y su generación de contaminación de acuerdo con la actividad poblacional del municipio mientras que, para los ST, alcanzó un 34% de remoción, tal como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17 Valores de ST en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados

Día	Afluente ST (mg/L)	Efluente ST (mg/L)	%remoción
5	634,5	504	21%
8	508,5	403	21%
10	470,5	450	4%
12	551	364	34%
Media	541,1	430,3	
Desviación estándar	70,4	60,4	

Durante la operación del reactor bajo los diferentes caudales, se tomaron en cuenta factores que influyeron en la eficiencia de remoción del sistema de lodos activados, por lo tanto, al pH, a la temperatura y al oxígeno se les hizo seguimiento.

Tabla 18 *Parámetros de control en el afluente y el efluente en el tratamiento de lodos activados*

Día	OD Afluente (mg/L)	OD Efluente (mg/L)	pH Afluente	pH Efluente	Temperatura Afluente (°C)	Temperatura Efluente (°C)
5	0,5	6,3	7,4	7,9	21,6	22,8
8	0,6	6,7	7,3	7,9	22,6	22,6
10	0,5	7,1	7,7	7,8	22,6	23,0
12	0,3	7,5	7,3	7,6	22,4	21,5
Media	0,5	6,9	7,4	7,8	22,3	22,5
Desviación estándar	0,1	0,5	0,2	0,2	0,5	0,7

A partir de esto, el OD del efluente del reactor tuvo un promedio de 6,9 mg/L de O₂ y tomando como referencia su desviación estándar, se encontró en un rango entre 6,4 y 7,4 mg/l de O₂. A su vez, un pH entre 7,6 y 8,0.

Para la segunda evaluación con $Q_2=2,9 \text{ mL/min}$ se hizo seguimiento durante 11 días de manera aleatoria a la DQO a la entrada y salida del reactor. Además, como parámetros de seguimiento se consideraron el OD, pH y Temperatura al afluente y efluente del reactor; dichos resultados se consignan a continuación:

Gráfica 4 *Resultados de DQO con $Q_2=2,9 \text{ mL/min}$*

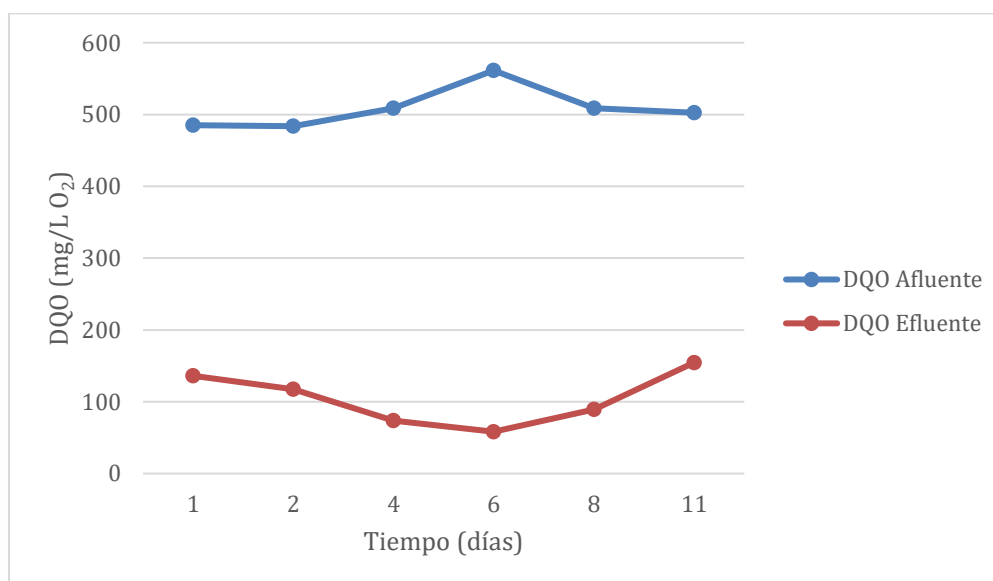


Tabla 19 Valores DQO y sus porcentajes de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados

Día	DQO Afluyente (mg/LO ₂)	DQO Efluente (mg/LO ₂)	%remoción
1	485,3	135,9	72%
2	483,7	117,3	76%
4	508,6	73,8	85%
6	561,4	58,3	90%
8	508,6	89,3	82%
11	502,4	154,5	69%
Media	508,3	104,8	
Desviación estándar	28,2	37,3	

Durante el tratamiento mediante Q₂ se obtuvo una máxima remoción de sustrato para un 90%. Así, se evidencia que, con un incremento en el caudal, la disponibilidad de sustrato para los microorganismos aumentó, el cual se consumió de forma eficiente.

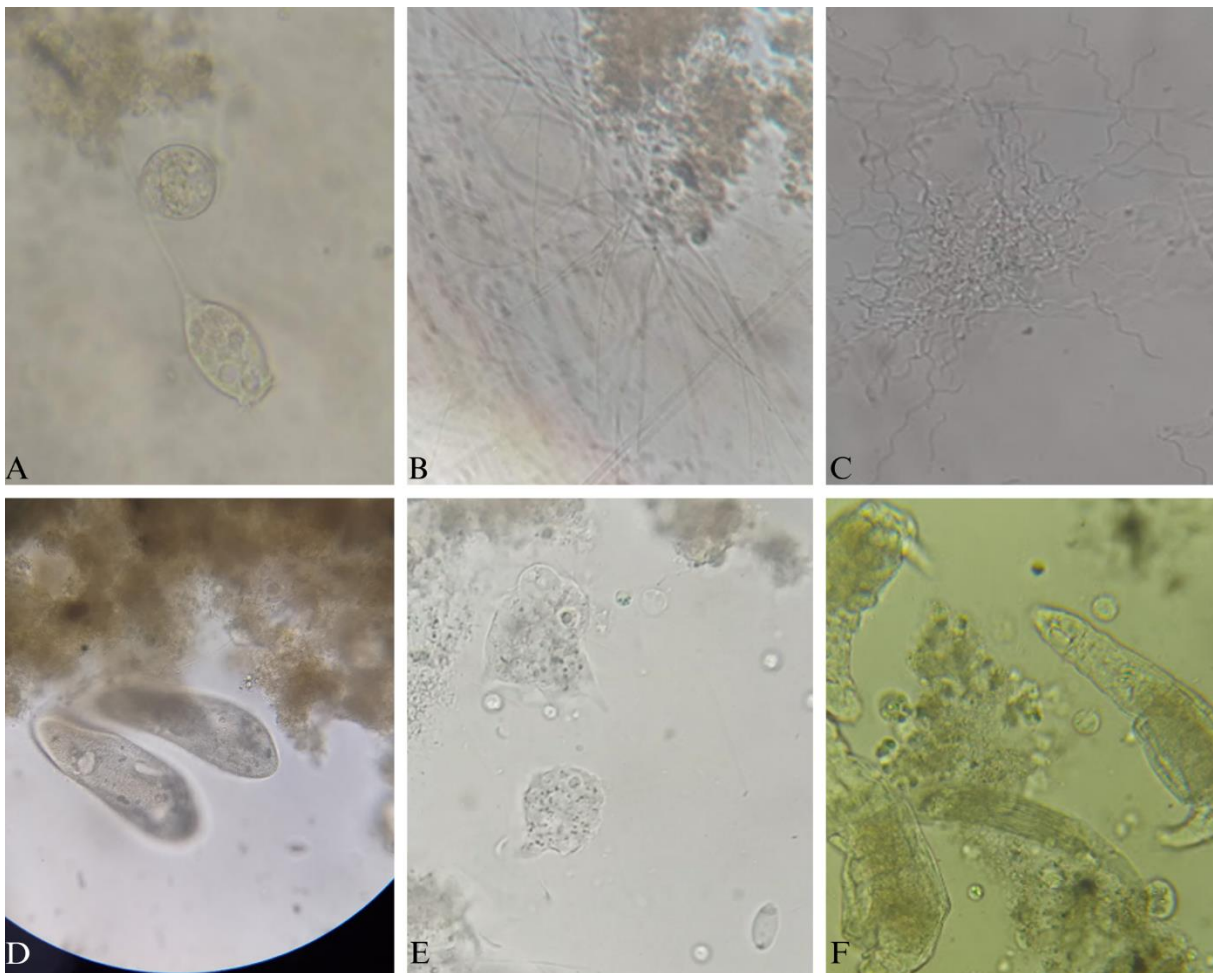
Tabla 20 Parámetros de control en el afluyente y el efluente en el tratamiento de lodos activados

Día	OD Afluyente (mg/L)	OD Efluente (mg/L)	pH Afluyente	pH Efluente	Temperatura Afluyente (°C)	Temperatura Efluente (°C)
1	0,1	6,7	7,3	8,1	23,8	24,7
2	0,4	7,1	7,7	8,2	23,1	23,4
4	0,3	7,3	7,5	8,1	22,4	21,7
6	0,4	6,8	7,3	7,7	24,1	24,6
8	0,5	7,0	7,3	6,8	24,2	23,9
11	0,3	7,2	7,2	6,7	23,3	22,9
Media	0,3	7,0	7,4	7,6	23,5	23,5
Desviación estándar	0,1	0,2	0,2	0,7	0,7	1,1

Como bien se mencionó, estos factores (Tabla 20) influyeron en el crecimiento microbiano, de manera en que se garantizó un ambiente óptimo para llevar a cabo toda su actividad. Con el aumento del caudal, el suministro de oxígeno estuvo relativamente constante y con una temperatura y pH promedios de 23,5 °C y 7,6 respectivamente para un rango entre 22,4 y 24,6 °C y 6,9 y 8,3 pH para el efluente, tomando como referencia sus desviaciones estándar.

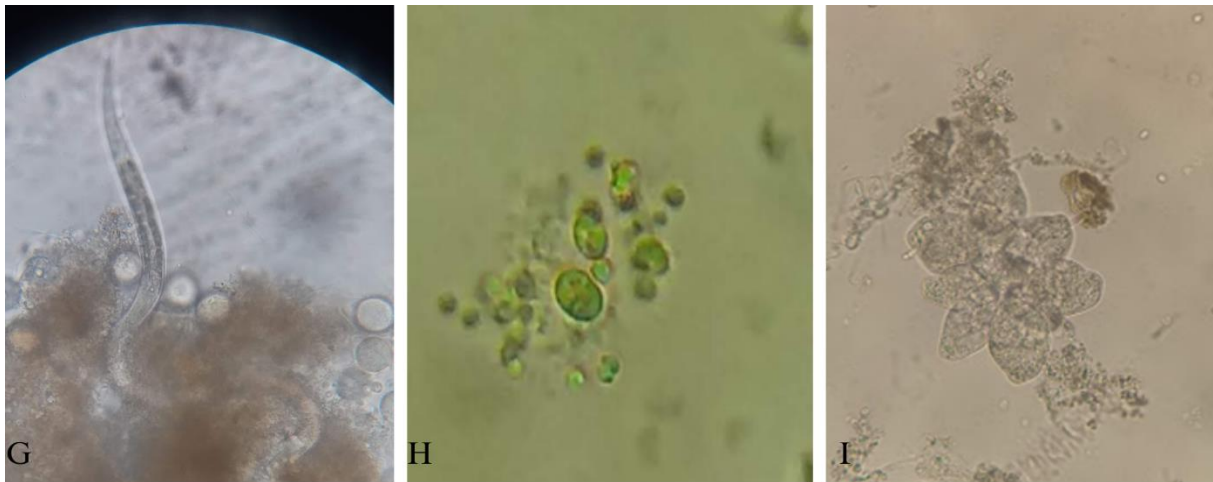
Seguidamente, se realizó microscopía en fresco al LMC, obteniendo los siguientes resultados resumidos en las fotografías que se plasman a continuación. En ellas, se demuestran los diferentes grupos de microorganismos que se encontraron durante el proceso bajo el caudal Q_2 : protozoos, bacterias filamentosas, bacterias con morfología espiral, nemátodos y huevos, microalgas y rotíferos. Se observó que los rotíferos, ciliados de vida libre y anclados predominaron. Además, las bacterias filamentosas crecieron en abundancia a través del tiempo de operación, sin presentarse problemas de *bulking*, un clave indicador de la operación del sistema (Díaz Fulgan, 2014). Los nemátodos y ameboides tuvieron una menor presencia.

Figura 10 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q_2



(A) ciliado anclado, (B) bacterias filamentosas, (C) bacterias morfología espiral, (D) ciliados libres, (E) ameboide, (F) rotíferos.

Figura 11 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q2



(G) nemátodo, (H) microalgas, (I) colonia de ciliados anclados.

Para la tercera evaluación con $Q_3=8,2 \text{ mL/min}$ se hizo seguimiento durante 13 días de manera aleatoria a la DQO a la entrada y salida del reactor. Además, como parámetros de seguimiento el OD, pH y Temperatura al afluente y efluente del reactor. Como información adicional, se determinó el IVL y la Velocidad de Sedimentación del LMC al concluir el tratamiento. Dichos resultados se consignan a continuación:

Gráfica 5 Resultados DQO con $Q_3=8,2 \text{ mL/min}$

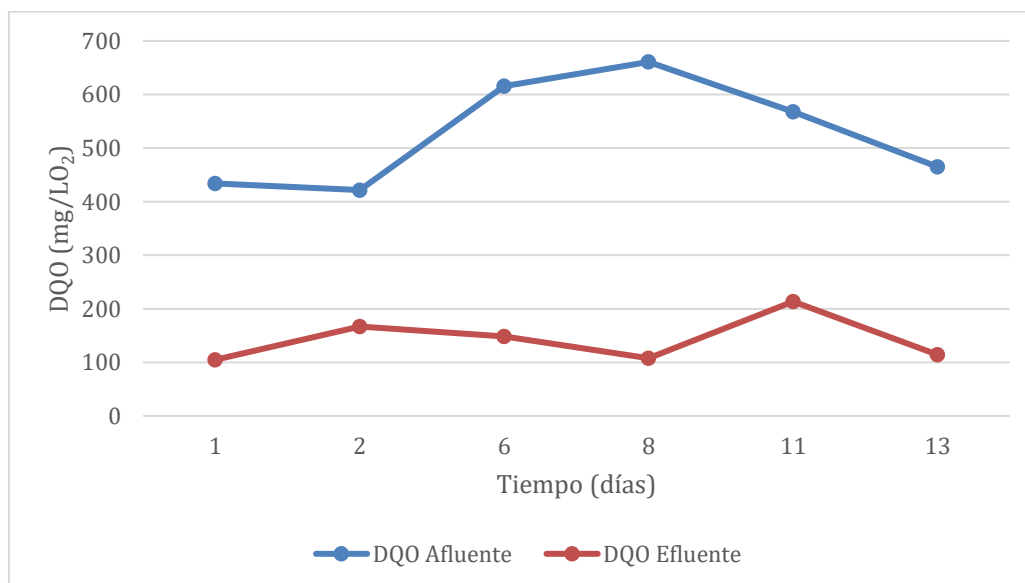


Tabla 21 Valores DQO y sus porcentajes de remoción (eficiencia) en el tratamiento de lodos activados

Día	DQO Afluyente (mg/L O ₂)	DQO Efluyente (mg/L O ₂)	%remoción
1	434,0	104,8	76%
2	421,6	167,0	60%
6	915,4	148,3	84%
8	660,8	108,0	84%
11	567,6	213,5	62%
13	465,1	114,2	75%
Media	577,4	142,6	
Desviación estándar	189,0	42,7	

En los resultados de la Gráfica 5 y Tabla 21 se refleja una significativa variación de la DQO en el afluyente, mientras que en el efluente una pequeña variación para el mismo parámetro. Confirmando de esta manera, una buena operación y desempeño en términos de eficiencia, con un aumento de caudal a 8,2 ml/min se logró una remoción de hasta el 84% de mg/L de O₂ en términos de DQO.

Tabla 22 Parámetros de control en el afluyente y el efluente en el tratamiento de lodos activados

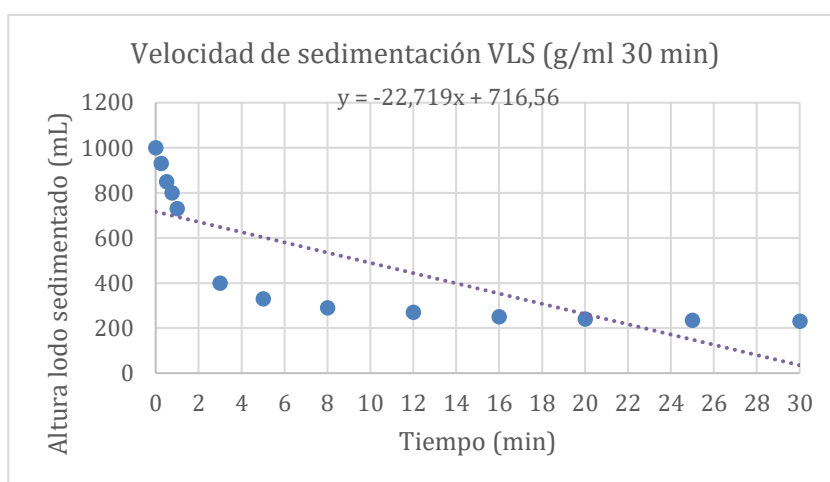
Día	OD Afluyente (mg/L)	OD Efluente (mg/L)	pH Afluyente	pH Efluente	Temperatura Afluyente (°C)	Temperatura Efluente (°C)
1	0,7	7,2	7,3	6,6	23,9	23,2
2	0,5	6,4	7,1	7,5	23,7	24,1
6	0,1	6,3	7,7	7,7	25,3	24,5
8	0,2	6,8	7,2	7,6	23,0	23,2
11	0,3	6,8	7,2	7,3	25,9	24,9
13	0,5	6,9	7,1	7,4	23,1	23,0
Media	0,4	6,7	7,3	7,3	24,2	23,8
Desviación estándar	0,2	0,3	0,2	0,4	1,2	0,8

Como se observó (Tabla 22), el pH tanto para el afluyente como el efluente se mantuvo más o menos constante. A su vez, los niveles de OD en el efluente estuvieron por encima de los 6,3 mg/L de O₂. Por otro lado, se tuvo una temperatura estable sin fluctuaciones, garantizando un ambiente que favoreció la actividad microbiana. Cabe resaltar que las concentraciones de

OD en el afluente estuvieron entre 0,2 y 0,6 mg/L de O₂, teniendo en cuenta su media y su desviación estándar.

En promedio se obtuvo 6,7 mg/L de OD, un pH de 7,3 y una temperatura de 23,8°C que, en efecto, no difieren con los de entrada excepto el OD, en vista de que los niveles de OD necesarios para oxidar la materia orgánica en el efluente y comparándolos con los de ingreso, se reducen, por lo tanto, hubo un efluente con mayor oxígeno al que ingresó, además de la aireación prolongada como requisito del tratamiento.

Gráfica 6 *Velocidad de sedimentación del LMC*

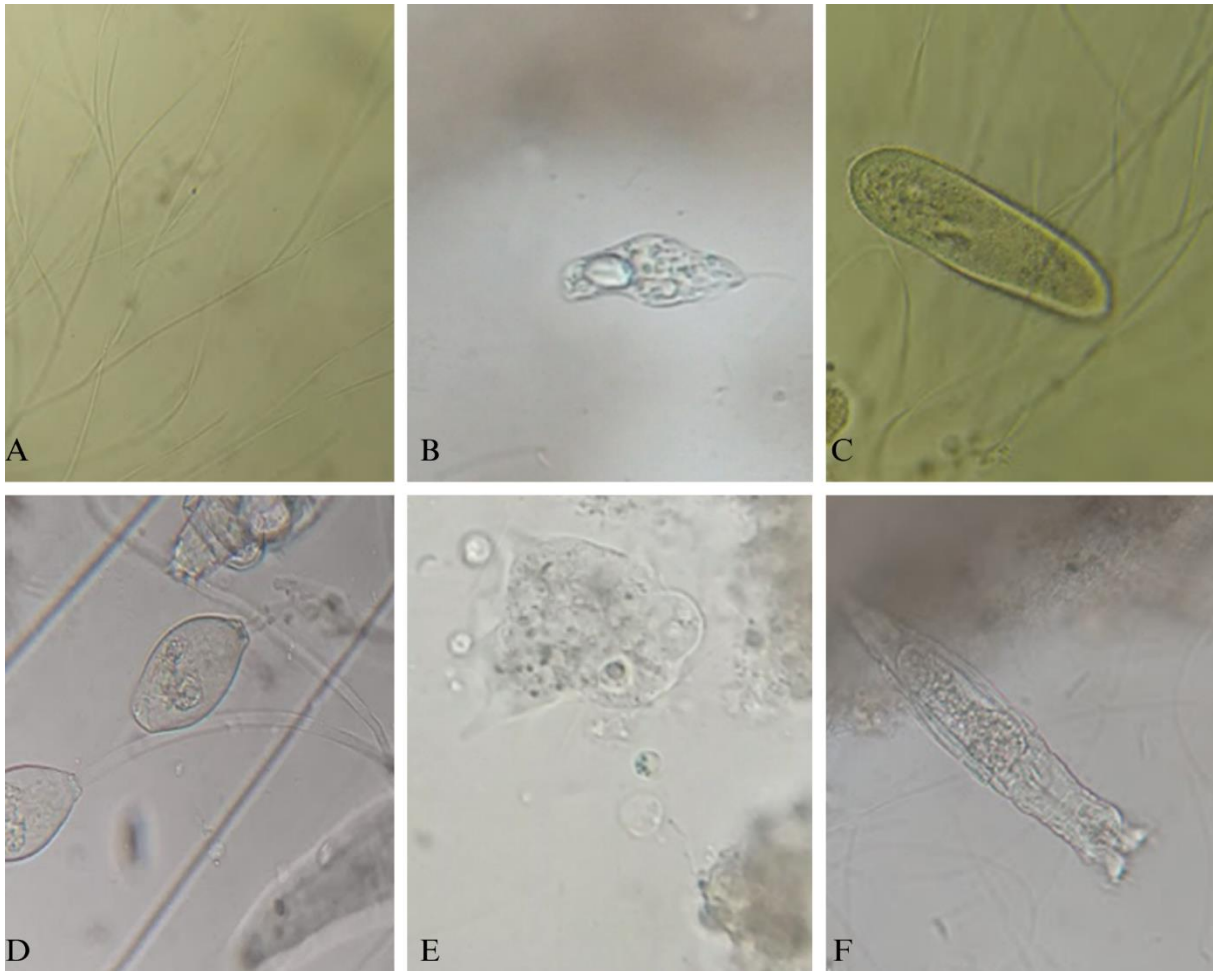


Calculando la pendiente se determinó la velocidad de sedimentación. Como resultado, se obtuvo que el lodo del LMC presentó una velocidad de sedimentación de **22,7 g/mL/min**. A su vez, se determinó el IVL dando como resultado **91,3 mL/g** para el LMC del sistema. A partir del IVL obtenido se pudo clasificar el grado de sedimentabilidad siendo este muy bueno (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017). A su vez, para este último cálculo se realizó el procedimiento de SST del LMC el cual fue de 2520 mg/L y 230 ml el volumen ocupado por los lodos después de 30 minutos de sedimentación. Por consiguiente, esta información arrojada es un indicador fundamental para lograr un efluente de buena calidad, tal como se demostró con la DQO.

Así mismo, igual que en el tratamiento con Q₂, para este Q₃ también se hizo seguimiento de los microorganismos durante el tiempo de operación. En la Figura 12 y 13 se presentan los microorganismos observados que hicieron parte de los lodos activados del sistema a escala laboratorio, destacando entre ellos bacterias filamentosas, protozoos flagelados, ciliados libres

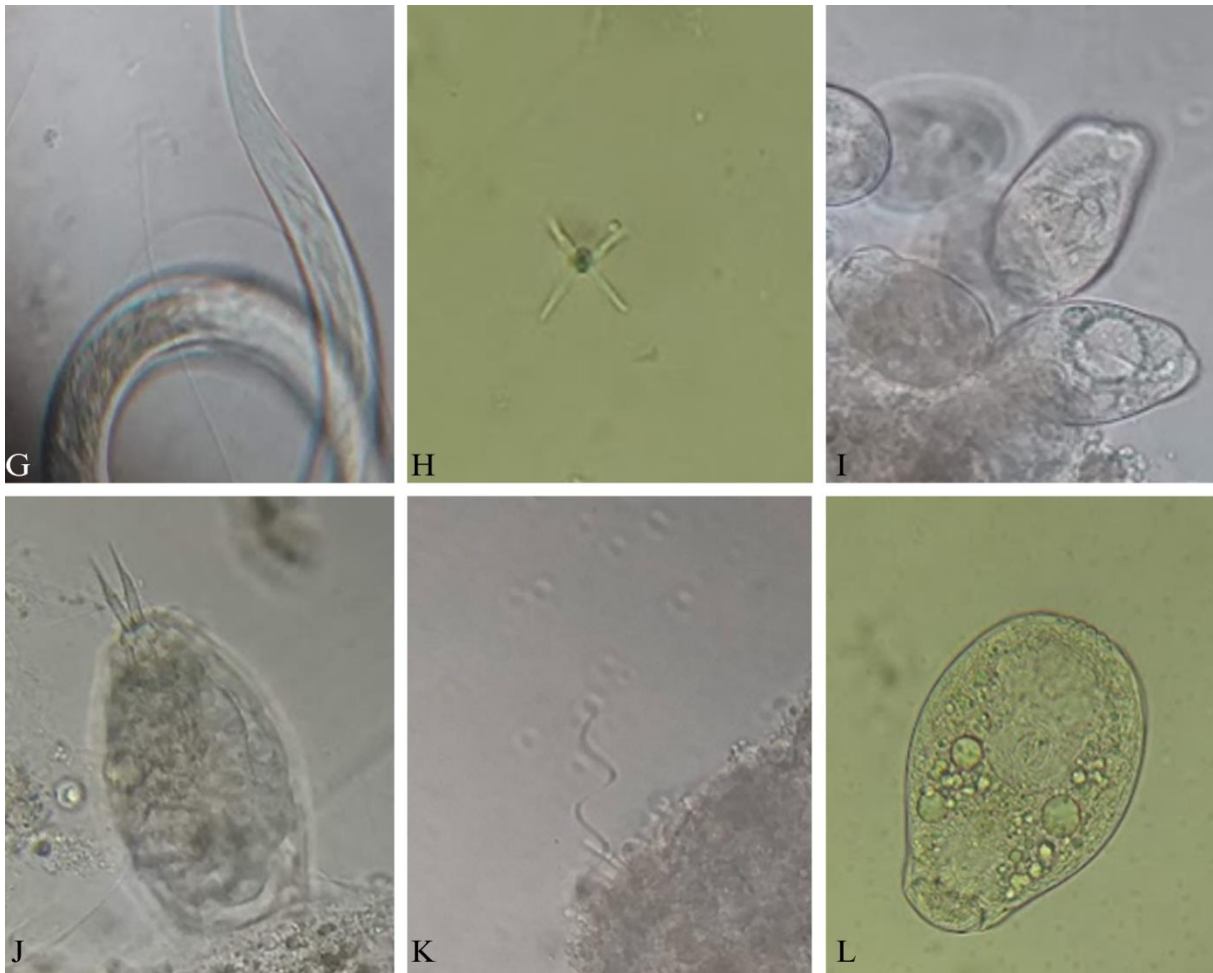
y fijos y rizópodos; rotíferos, nemátodos y algas. Se determinó que el sistema estabilizado presentó abundancia de sésiles, debido a que estos permanecieron asociados a los flóculos. A su vez, ciliados fijos y rotíferos se comportaron como un indicador de estabilidad en el montaje. Se tomó como referencia a (Morales, 2014) acerca de lo observado en el comportamiento del reactor y los microorganismos en mención.

Figura 12 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q_3



(A) bacterias filamentosas, (B) protozoo flagelado, (C) ciliado libre, (D) ciliado sésil, (E) ameboide, (F) rotífero.

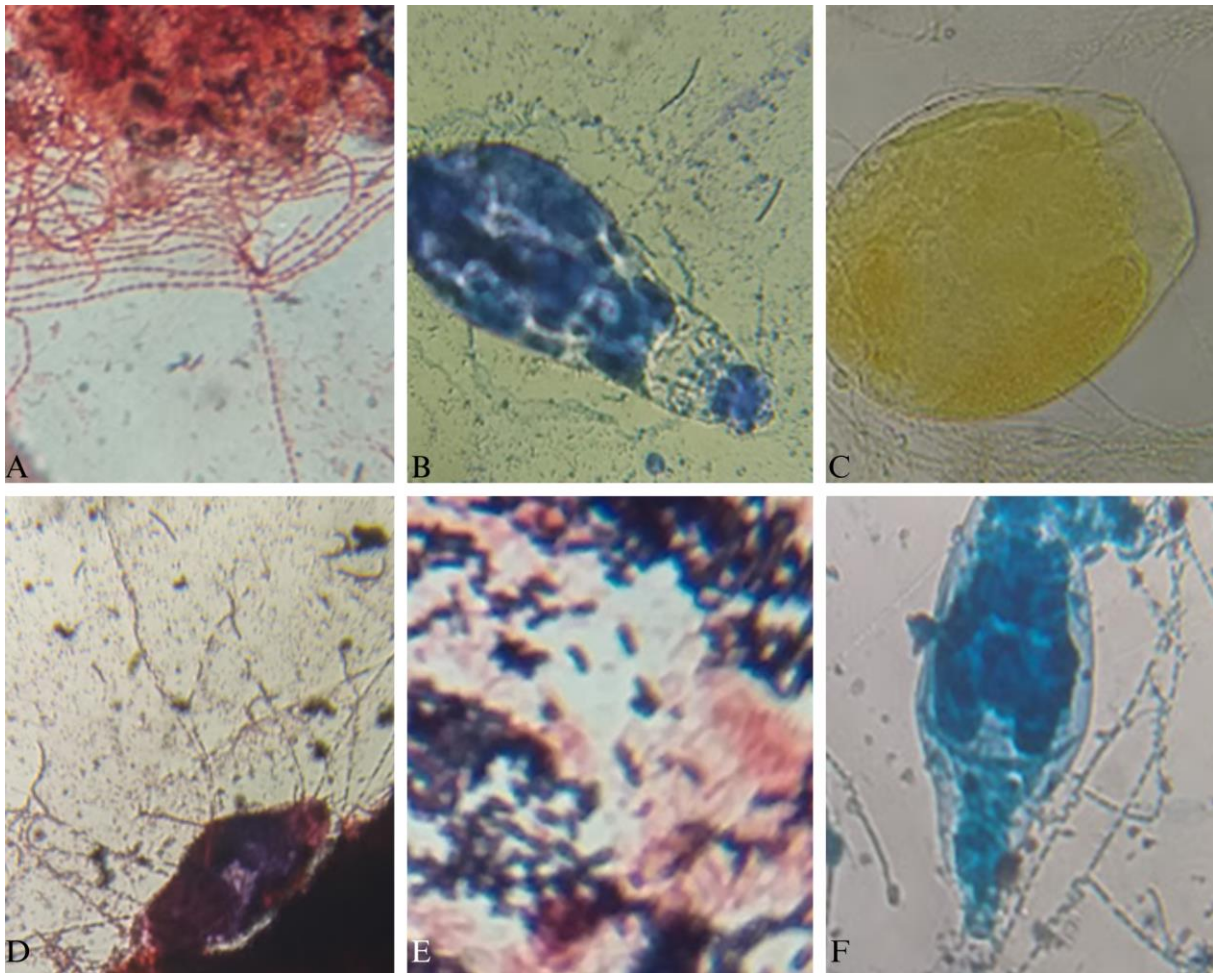
Figura 13 Fotografías de microorganismos observados en 40X en el tratamiento con Q_3



(G) nemátodo, (H) microalga, (I) ciliado sésil, (J) rotífero, (K) bacteria morfología espiral, (L) protozoo.

Adicional a las muestras en fresco para este caudal, se realizó microscopía con colorantes, observando los siguientes microorganismos:

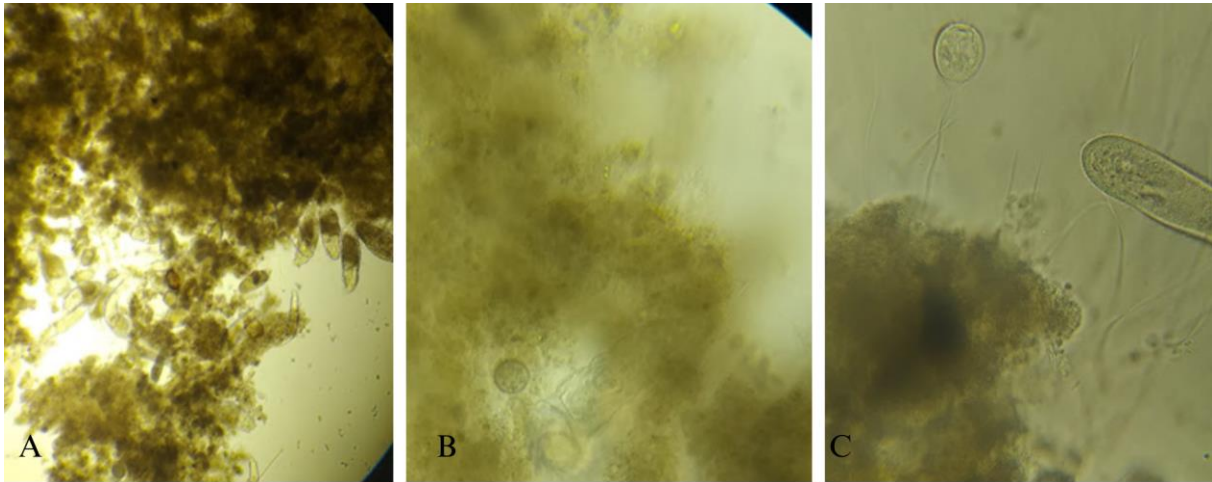
Figura 14 Fotografías de microorganismos observados en 40 y 100X en el tratamiento con Q_3



(A) Tinción Gram, (B) y (F) Verde metil acético, (C) Lugol, (D) Tinción PHB, (E) Tinción Neisser.

Como complemento a las observaciones efectuadas por microscopía, también se realizó el análisis del flóculo en los tres caudales empleados. Se concluyó que el flóculo presentó una estructura compacta, en alta concentración y de un tamaño grande, tal como se resume en la Figura 15. El seguimiento del *floc* fue un indicativo de la variedad de microorganismos, abundancia de algunas especies respecto a otras y demostró el grado de maduración del lodo (González-Leal, 2012). Estos flóculos como estructura y de estas características dentro del proceso produjeron un efluente clarificado (Díaz Fulgan, 2014).

Figura 15 Caracterización del flóculo observados en 10 y 40X en el tratamiento de lodos activados



(A) y (B) estructura compacta y en alta concentración del *floc* y (C) diversidad de microorganismos como bacterias filamentosas, ciliados sésiles y ciliado libre.

8 Discusión

Durante las fases de operación del sistema, se consideraron varios factores que influyeron en la eficiencia de remoción de la materia biodegradable como contaminante del ARD que fueron el pH, la temperatura y el Oxígeno Disuelto. Partiendo de la caracterización inicial del afluente y del lodo utilizados de la PTAR, se registraron una temperatura y un pH dentro del rango de eficiencia para el tratamiento secundario implementado; debido a esto, se observaron unas condiciones adecuadas para el desarrollo microbiológico y su actividad enzimática (Arcos, 2014). En el afluente del tratamiento de lodos activados, el OD fue relativamente bajo; se deduce, de acuerdo con la determinación de la DQO, una demanda de alta concentración de oxígeno para degradar toda la materia orgánica presente en las muestras de ARD. Esto indica que, comparando el afluente y el efluente del reactor, la aireación artificial garantizó unas concentraciones aptas para el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos responsables del tratamiento que generalmente están entre 0,2 a 2,0 mg/L O₂ (Cuadrado & Cuartas, 2019).

A su vez, el lodo del LMC presentó un comportamiento “bueno” de sedimentabilidad de la suspensión, clave para una sedimentación ideal y un efluente clarificado, evitando un lavado. Este parámetro es fundamental para los sistemas de sedimentación en los tratamientos de aguas residuales para la remoción de la materia suspendida y disuelta en el recurso (Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017). De esta manera, esta velocidad determinó la capacidad de separar los SSED para así tener un efluente claro en el sistema de tratamiento, de acuerdo con la velocidad en que sedimentó la partícula debido a la fuerza de gravedad y a su misma naturaleza. Así, una gran masa de microorganismos metabolizó la materia orgánica convirtiéndola en energía y nuevo sustrato, formándose esa biomasa de forma compacta y floculenta, y a su vez, con una sedimentación rápida; por lo tanto, fue esencial para el tratamiento para un efluente clarificado (Ferrara-Giner & Ramírez, 2013).

Ahora bien, el IVL fue una aproximación a lo que sucedió con la sedimentabilidad del lodo, como control de aumento o disminución de su volumen provocado por crecimiento excesivo de bacterias filamentosas; lo que significó que un alto índice produciría volúmenes de lodo superiores y uno bajo, provocaría lavado de los mismos (Morales, 2014). Se considera que valores por debajo de 80 mg/L son excelentes y entre 80 y 150 mg/L son moderados, lo cuales indicaron una buena sedimentación y se obtuvo un lodo compacto (Ferrara-Giner & Ramírez,

2013). Relacionando estos dos parámetros, el lodo sedimentado de la planta presentó una sedimentabilidad adecuada para su posterior activación en el laboratorio y remoción esperada de biomasa bajo la aplicación del tratamiento. De igual manera, se infirió la presencia de microorganismos filamentosos, en vista de que fueron los responsables en la formación del flóculo y conllevaron a la sedimentabilidad antes mencionada (Díaz Fulgan, 2014).

En el curso de la activación del inóculo y el montaje en lote, se demostró que el lodo en aireación y mezcla completa con el agua residual de la PTAR y con concentraciones altas de materia orgánica, tuvo una actividad biológica por parte de los microorganismos de los lodos activados que metabolizaron el sustrato presente (González-Leal, 2012), que en síntesis, fue una remoción de la carga contaminante. Por consiguiente, los microorganismos estuvieron activos a la espera de más sustrato para metabolizar, que en esta etapa del proyecto se dio paso al sistema en modo continuo con los diferentes caudales de tratamiento.

A partir de la medición del LMC en la activación del inóculo en el sistema en lote, el OD fue superior a la concentración mínima de 2 mg/L recomendada para una buena relación entre el sustrato a metabolizar y los microorganismos (Arcos, 2014) y en relación al tiempo de activación en el sistema en lote, se presentó una aireación estable en el LMC.

Seguidamente, la operación bajo los diferentes caudales de tratamiento demostraron que, los microorganismos con una temperatura, un pH, oxigenación y un sustrato adecuados, degradaron los contaminantes presentes y a su vez, se favoreció su diversidad (Mulford-Santamaría, 2015). Esos parámetros de control se mostraron en los resultados plasmados a lo largo del tratamiento sin cambios bruscos, corroborando un ambiente idóneo para el sistema.

Adicionalmente, la materia en suspensión que ingresó al reactor se removió hasta en un 95% con Q_1 . Se relacionó esta eficiencia con un equilibrio de microorganismos filamentosos, en vista de que un crecimiento excesivo de ellas provocaría una suspensión alta en el efluente; dicho de otro modo, estos microorganismos fueron los responsables de la formación de la estructura flocular (Díaz Fulgan, 2014) y se encargaron luego, para una posterior degradación de la materia orgánica (Balcárcel G. et al., 2014). Sin olvidar los ST, se registró una remoción máxima del 34%, que por el contrario de ser un mal resultado, fue un dato adicional a toda la materia que quedó después de un secado a 105°C; es decir, restó el material disuelto, en

suspensión y los volátiles (APHA, 2012). En síntesis, hubo una remoción de una parte de toda el material orgánico e inorgánico que presentaba el agua.

En términos de eficiencia, se alcanzó una remoción de hasta el 90% en términos de DQO para la operación a 2,9 mL/min con un ambiente en el LMC adecuado con condiciones de temperatura, pH y OD. Se observó variación en el afluente de forma en que contuvo más materia contaminante y a su vez, el efluente presentó una remoción más alta, dando como prueba de que bajo unas condiciones óptimas de sustrato y TRH, además de las mencionadas, los microorganismos alcanzaron a metabolizar el volumen de agua residual que ingresó en el tiempo determinado de operación. Cabe resaltar que al final de la evaluación, se presentó la remoción más baja en todo el tiempo ejecutado, pero no un resultado que difiere de todas las remociones alcanzadas.

De igual forma, con un aumento del caudal 2.9 a 8.2 mL/min no se presentaron fluctuaciones abruptas en las condiciones de pH, temperatura y OD, garantizando un ambiente idóneo como parámetros de control para los microorganismos aerobios responsables del tratamiento (Arcos, 2014).

También se determinó la velocidad de sedimentación y su pendiente, tomándose como un indicador fundamental para lograr un efluente de buena calidad, tal como se demostró con la DQO, en vista de que no se presentaron flóculos disgregados y fenómenos como *bulking* y *foaming* (Rodríguez & Molina, 2018). Como complemento, la estructura del flóculo, la actividad microbiana y la remoción alcanzada fueron relaciones que, como se evidenció, determinaron el comportamiento del tratamiento evaluado.

Es oportuno mencionar los microorganismos encontrados durante las operaciones evaluadas y reportar su función según la literatura, confirmando su presencia en este sistema a escala laboratorio. Por un lado, estaban las bacterias que fueron las responsables de la oxidación de la materia orgánica y la conversión de nutrientes, encontrando en este grande grupo las formadoras de la estructura básica del flóculo y libres con forma de espiral; por otro lado, los protozoos que fueron los encargados de controlar la población bacteriana y contribuir a la reducción de la DBO, se encontraron los flagelados, ciliados libres, ciliados fijos y amebas; además, estaban los rotíferos que cumplieron una doble función y fue la de contribuir a la remoción de bacterias y también a la formación del flóculo; también, se hallaron los nemátodos

que en equilibrio, fueron compatibles con una buena calidad del tratamiento; y no olvidar a las algas que, su presencia indicó una buena calidad del efluente (Arcos, 2014; Eikelboom, 2000; González-Leal, 2012; Molina-Pérez & Rodríguez-Loaiza, 2017; Mulford-Santamaría, 2015).

9 Conclusiones

De acuerdo con la caracterización inicial del lodo y del ARD de la PTAR y la evaluación del sistema secundario de lodos activados a escala laboratorio a diferentes caudales de operación, se determinó una eficiencia superior al 70% en términos de remoción de DQO. De esta manera, se comprobó la hipótesis planteada que servirá como propuesta para la ampliación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas del municipio de Andes, con el fin de reducir las concentraciones de carga contaminante que, como se evidenció, tienden a ser altas. Para los tres caudales de operación del sistema las concentraciones de contaminación presente en el efluente de la PTAR fueron removidas por un proceso biológico.

Según los resultados obtenidos, los lodos sedimentados del tratamiento primario de la PTAR presentaron en su naturaleza una calidad para ser activados y una potencialidad para ser tratamiento secundario, mediante la aplicación de oxígeno. Por ende, se evidenció una operación eficiente en la PTAR, en vista de que el lodo sedimentado y el agua residual no presentaron variaciones en temperatura y pH, garantizando unas condiciones adecuadas para los microorganismos. A su vez, la sedimentabilidad fue óptima desde los lodos sedimentados de la PTAR y el LMC del reactor, indicando una calidad para ser usados como tratamiento y para la remoción de materia en suspensión para un efluente clarificado, respectivamente.

Del mismo modo, como seguimiento microbiológico, se encontró una diversidad de grupos microbianos en los lodos activados para un proceso satisfactorio de remoción de contaminantes.

El estudio arrojó que el tratamiento de los lodos activados a escala laboratorio removió las concentraciones de materia biodegradable hasta por debajo de los límites máximos permisibles. Con relación a la PTAR, según los reportes y las revisiones sistemáticas, la sedimentación primaria para el tratamiento de ARD operando de una manera eficaz, no alcanza la remoción que exige la norma vigente. Por lo tanto, no es una inadecuada operación, en vista de que el experimento demostró lo contrario, si no que, es necesaria la implementación de un sistema de tratamiento secundario para lograr esas remociones. Además, se toma la información brindada por la Empresa Prestadora y la observación durante los muestreos que, el reactor UASB, que por su naturaleza es para procesos biológicos, no se usa para tratar ARD de la PTAR, si no, para los lodos generados en la sedimentación primaria.

10 Recomendaciones

Se recomienda realizar una identificación y caracterización de los microorganismos actores en el tratamiento de lodos activados propuesto hasta un nivel taxonómico como especie, como parámetros de control del funcionamiento de la PTAR y su ecología. Además, debido a su naturaleza en vista de que son especies nativas del ARD y del lodo del municipio de Andes. Así mismo, se relacionarían las eficiencias de remoción de materia orgánica en función de los microorganismos encontrados.

También se sugiere realizar la determinación de los coeficientes cinéticos de crecimiento biológico; esto permitiría comparar la cinética de consumo de sustrato y la presencia de microorganismos para el diseño de lodos activados a escala real para el tratamiento del efluente en cuestión.

Adicionalmente, evaluar la eficiencia con otros caudales y tiempos de retención hidráulica para reducir la carga contaminante evidenciada en los parámetros analizados en este estudio, obteniendo una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica respecto a los caudales evaluados. También, realizar montajes con un fundamento diferente al continuo y aerobio, tales como lodos activados diferentes al convencional, cambiando el reactor y los sistemas de aireación. Todo esto para evaluar y comparar resultados y establecer la mejor propuesta para la implementación a escala real del sistema.

Como parte del diseño del reactor, se recomienda instalar una válvula en el sedimentador para la purga de lodos en caso de que se requiera y no se desee la recirculación.

Referencias

- Alpírez, J., Avilés, K., Castillo, H., Pinzón, I., Poveda, R. M., & Vallester, E. (2017). Evaluación de un sistema biológico de lodos activados a escala de laboratorio. *Revista de Iniciación Científica*, 3, 8 Pag. <https://bit.ly/3LNjkvP>
- APHA. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/white-papers/apha-water-testing-standard-methods-introduction-white-paper.pdf
- Arcos, Y. (2014). *Microbiología de lodos activados Microbiology of the activated sludge*. 4(2), 117–122.
- Quick determination of filamentous microorganisms in activated sludge, 19 Tecnología del Agua 102 (1999).
- Balcárcel G., L. M., Erazo H., P. N., Vides G., A. M., & Ramírez P., A. (2014). Parámetros fisicoquímicos asociados a la proliferación de bacterias filamentosas (Bulking filamentoso) en las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados: revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 3(2), 47–58. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.18736>
- Banco Mundial. (2020). El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial. In *Bancomundial.org*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>
- Caravali Lasso, M., Lote Veloza, M. L., & Echeverry Prieto, L. C. (2017). Evaluación de los Parámetros Fisicoquímicos en un Reactor Discontinuo de Lodos Activados para el Tratamiento de Aguas con Metanol. *Ingeniería*, 22(0121-750X), 6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5817972>
- Castillo Reinoso, A. M., Criollo Quizphi, E. C., & Oñate Oñate, M. P. (2020). Diseño e implementación de una PTAR por lodos activos a escala de laboratorio. *Ciencia Digital*, 4(1), 385–406. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1119>
- Ceja de la Cruz, Z. (2019). Tratamiento de Aguas Residuales. *INCyTU*, 52(028), 1–6. https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf
- Cuadrado, J., & Cuartas, C. (2019). *Evaluación experimental de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados a escala piloto, alimentado con agua residual artificial, a partir de un aumento de presión en el sistema*. Universidad Santo Tomás.
- Díaz Fulgan, N. K. (2014). Importancia de los microorganismos filamentosos en el sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 10, 2–8.
- Eikelboom, D. H. (2000). *Proces control of activated sludge plants by microscopic investigation*. IWA Publishing. http://minerva.ugent.be/courses2016/I70016802016/document/Oefeningen/Leerpad_4/iw_a_process_control_of_activated_sludge_plants_by_microscopic_investigation_2000.pdf?

cidReq=I70016802016

- Ferrara-Giner, G., & Ramírez, A. (2013). Settability analysis of biological sludges produced in SBR during effluent biological reactor denitrification. *Revista de La Facultad de Ingeniería*, 28(1), 37–44.
- González-Leal, G. (2012). *Microbiología del Agua Conceptos y Aplicaciones*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Hincapié-Pérez, M., & Chaverra-Cardona, G. (2015). *Diagnóstico de Aguas Manual de laboratorio* (L. López (ed.)). Sello Editorial Universidad de Medellín.
- IDEAM. (2002). *Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas*. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3834
- Ingeniería total - Servicios públicos S.A. ESP. (2007). Plan de saneamiento y manejo de vertimientos de Andes. Andes, Antioquia
- La_Iglesia, J. (2016). *Fundamentos Lodos Y Tipos De Reactores*. 32. <https://static.eoi.es/savia/documents/fundamentoslodos.pdf>
- Lopez, A.;Cabrera, M.;Carrillo, Y. . (2017). Remoción De Contaminantes Orgánicos Presentes En Agua Residual Doméstica Mediante Prototipo a Escala de Laboratorio. *La Granja Revista de La Vida*, 26(2), 72–83.
- Milena, L. B., & Isabel, O. G. M. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. *Universidad Nacional de Colombia*, 82. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20486/marthaisabelorjuela2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo. (2015). *Resolución 0631 de 2015*. <https://doi.org/10.4324/9780203861950>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 330 de 2017*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Molina-Pérez, F., & Rodríguez-Loaiza, D. (2017). Procesos biológicos. In *Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental*. Universidad de Antioquia.
- Morales, G. (2014). Evaluación de la Estabilidad de un sistema de Lodos Activados mediante Indicadores Físicoquímicos y Biológicos [Universidad de Concepción]. In *Centro de Ciencias Ambientales*. <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-gabriela-morales-2014.pdf>
- Mulford-Santamaría, E. (2015). *Análisis y evaluación del comportamiento microbiológico de dos biorreactores modificados FLOCAIRFP al 10% y 15% de aireación, en la planta piloto de aguas residuales en la sede El Vivero de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas* [Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/217
- ONU-HABITAT y OMS. (2021). Progreso en el tratamiento de las aguas residuales. In *Naciones Unidas y Organización Mundial de la Salud*. <https://www.unwater.org/publications/progress-on-wastewater-treatment-631-2021-update/>
- Osorio- Rivera, M. A., Carrillo- Barahona, W. E., Negrete-Costales, J. H., Riera-Guachichulca, E. J., & Loo-Lalvay, X. A. (2020). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo*

Del Conocimiento, 6(3), 228–245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>

PNUD. (2018). ODS en Colombia: los retos para 2030. *ODS En Colombia: Los Retos Para 2030*, 74. <https://www.unibarranquilla.edu.co/docs/ODS-en-Colombia-Retos-2030.pdf>

Ramos, C. (2017). EVALUACION DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS PARA LA REMOCION DE CARGA ORGANICA EN LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS GENERADAS EN EL COLEGIO SAN VIATOR [Fundación Universidad de América]. In *Fundación Universidad de América*. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6578>

Rodríguez, L. (2020). *El proceso de tratamiento de aguas residuales y eliminación de contaminantes emergentes*. Iagua. <https://www.iagua.es/blogs/lander-rodriguez-jorge/proceso-tratamiento-aguas-residuales-y-eliminacion-contaminantes>

Rodríguez, L., & Molina, F. (2018). Estrategias operacionales para el control de problemas de baja sedimentación causados por bacterias filamentosas en plantas de lodos activados. *Revista Científica En Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS.*, 4(1), 1–10. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA>

UNESCO. (2017). Las Aguas Residuales El recurso desaprovechado. In *WWAP*.

Vargas, A., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia Biological system analysis for domestic wastewater treatment in Colombia. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 28 N°2, 315–322. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v28n2/0718-3305-ingeniare-28-02-315.pdf>

Vásquez, E. (2017). *Contaminación del agua: causas, consecuencias y soluciones*. Agua.Org. <https://agua.org.mx/contaminacion-del-agua-causas-consecuencias-soluciones/>

Zapata-Toro, A. M. (2017). *Análisis y muestreo en el sistema de acueducto y alcantarillado*. <https://www.empresadeserviciospublicosdeandes.gov.co/estudios-e-investigaciones/analisis-y-muestreo-en-el-sistema-de-acueducto-y-alcantarillado>