

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

**Aplicación de tratamiento biológico de biopelícula adherida de cama móvil
para la remoción de DQO en aguas residuales domésticas**

Autor:

BQF. Cristhian Arturo Zambrano Cabrera, Mgtr.

Tutor:

Ing. Diego Barzallo Granizo, MSC

Milagro, 2024

Derechos de autor

**Sr. Dr.
Fabricio Guevara Viejó**
Rector de la Universidad Estatal de Milagro
Presente.

Yo, **Cristhian Arturo Zambrano Cabrera**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magister en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación Medición y Control Ambiental de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Informe de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 16 junio del 2024

Cristhian Arturo Zambrano Cabrera
CI. 0704525583

Aprobación del tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **MSC. Diego Barzallo Granizo** en mi calidad de tutor del trabajo de titulación, elaborado por **Cristhian Arturo Zambrano Cabrera**, cuyo tema es **Aplicación de tratamiento biológico de biopelícula adherida de cama móvil para la remoción de DQO en aguas residuales domésticas**, que aporta a la Línea de Investigación **Medición y Control Ambiental**, previo a la obtención del Grado **Magister en Biotecnología**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 16 junio del 2024

MSC. Diego Geovanny Barzallo Granizo

CI. 0603923095

TUTOR

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, presentado por **BQF. ZAMBRANO CABRERA CRISTHIAN ARTURO**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "APLICACIÓN DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE BIOPELÍCULA ADHERIDA DE CAMA MÓVIL PARA LA REMOCIÓN DE DQO EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS", las siguientes calificaciones:

TRABAJO ESCRITO	58.43
SUSTENTACIÓN	38.83
PROMEDIO	97.27
EQUIVALENTE	Excelente



Firmado electrónicamente por:
**LUIS EDUARDO CAGUA
MONTANO**

Mgs CAGUA MONTAÑO LUIS EDUARDO
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**MARIA FERNANDA
GARCÉS MONCAYO**

Msc GARCÉS MONCAYO MARÍA FERNANDA
VOCAL



Firmado electrónicamente por:
**ALEX EDWIN GUILLEN
BONILLA**

Ing. GUILLEN BONILLA ALEX EDWIN
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado en primer lugar a Dios por ser quien nos da la fuerza, vida y salud, para poder lograr los objetivos propuestos; en segundo lugar a mis padres quienes con su ejemplo de perseverancia han hecho de mi un hombre que lucha por sus ideales; finalmente, pero no menos importantes mis hijos quienes con su amor incondicional han logrado que todos mis esfuerzos valgan cada sacrificio.

CRISTHIAN ARTURO ZAMBRANO CABRERA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por ser la luz que guía mi camino; a los docentes de la UNEMI que con sus valiosos conocimientos y experiencias fueron los mentores en todas las asignaturas recibidas a lo largo de la maestría, de manera especial a mi TUTOR de Proyecto de Investigación MGS. DIEGO BARZALLO, y al PHD. BYRON LAPO, por su acompañamiento y apoyo constante en el desarrollo del presente trabajo.

Resumen

El tratamiento de agua residual en Ecuador es una necesidad parcialmente atendida, ocasionando problemas ambientales y de salud pública. La búsqueda de sistemas y tecnologías de tratamiento eficaces y de bajo costo, así como las pruebas de laboratorio en sistemas reales son cruciales para determinar los parámetros de diseño y operación efectivos aplicados a las condiciones particulares de cada efluente. El presente trabajo de investigación evaluó en que condiciones de operación, tales como el caudal, tiempo de retención hidráulica y carga orgánica volumétrica puede operar un sistema de tratamiento biológico aerobio de biopelícula adherida de cama móvil, conocido por sus siglas en inglés como mbbr (moving bed biofilm reactor), utilizando materiales de soporte plásticos tipo Kaldness K1. Se evaluó el crecimiento de biomasa tanto adherida como suspendida, así como se determinó la eficiencia de remoción de DQO a lo largo de 30 días a diferentes caudales y por tanto diferentes cargas orgánicas volumétricas y tiempos de retención hidráulicos. Los resultados en cuanto al desarrollo de biomasa mostraron que se acumuló más biomasa total en los reactores B2 y B3, mismos que presentaron diferencias estadísticamente significativas con el reactor B1, estos resultados están acorde a lo esperando comparado con estudios similares. Por otra parte, la remoción de DQO se llevo a cabo en mejor nivel en el reactor B1 con hasta un 97% de eficiencia de remoción de DQO, comparado con los reactores B2 y B3. Este resultado se atribuyo a que en este sistema se trabajó con una menor carga orgánica volumétrica ($2,05 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$) vs. $3,07$ o $6,14 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ utilizados en los reactores B2 y B3. Sin embargo, para todos los regímenes se obtuvo altas tasas de remoción de DQO de hasta el 73%. En conclusión, el presente trabajo demuestra la factibilidad de uso de reactores aerobios de biopelícula adherida para agua residual doméstica, en rangos de carga orgánica de 2 a $6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$, con tiempos de retención hidráulica de $3,3$ a 10 horas.

Palabras clave: biopelícula, mbbr, agua residual doméstica

Abstract

The wastewater treatment in Ecuador is a need partially attended, causing environmental and public health issues. The search for effective and low-cost treatment systems and technologies, as well as laboratory tests on real systems, are crucial to determine the effective design and operational parameters applicable to the particular conditions of each effluent. This research evaluated under what operational conditions, such as flow rate, hydraulic retention time, and volumetric organic loading rate, a biological treatment system with a moving bed biofilm reactor (MBBR) using Kaldness K1-type plastic support materials can operate. Biomass growth, both attached and suspended, was evaluated, and the Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency was determined over 20 days at different flow rates, thus different volumetric organic loads and hydraulic retention times. The biomass development results showed that reactors B2 and B3 accumulated more total biomass, with statistically significant differences compared to reactor B1. These results align with expectations when compared to similar studies. Additionally, the COD removal was highest in reactor B1, achieving up to 97% COD removal efficiency, compared to reactors B2 and B3. This result was attributed to the lower volumetric organic loading rate in reactor B1 (2.05 kg/m³·d) versus 3.07 or 6.14 kg/m³·d used in reactors B2 and B3. Nevertheless, high COD removal rates of up to 73% were obtained for all regimes. In conclusion, this study demonstrates the feasibility of using aerobic biofilm reactors for domestic wastewater treatment, within organic loading ranges of 2 to 6 kg/m³·d, with hydraulic retention times of 3.3 to 10 hours.

Keywords: biofilm, mbbf, domestic wastewater

Índice / Sumario

Resumen	vii
Abstract	viii
Introducción	1
CAPITULO I: El problema de la investigación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Delimitación del problema	3
1.3 Formulación del problema.....	4
1.4 Preguntas de investigación	4
1.5 Objetivo general.....	4
1.6 Objetivos específicos	4
1.7 Declaración de las variables (operacionalización)	5
1.8 Justificación.....	5
1.9 Alcance y limitaciones.....	5
CAPÍTULO II: Marco teórico referencial	7
2.1. Aguas residuales.....	7
2.1.1 Tipos de aguas residuales.....	7
2.1.2 Agua residual doméstica	7
2.2. Tratamiento de aguas residuales	8
2.2.1 Tratamiento biológico de aguas residuales.....	9
2.2.2 Sistema de biomasa adherida.....	9
2.2.3 E.coli y su relación con soportes plásticos Kaldness K1	10
2.2.4 Reactor biológico de leche móvil	10
2.2.5 Niveles de tratamiento.....	13
2.3. Análisis de calidad de agua.....	13
2.3.1 Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5)	14
2.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO).....	15
2.3.3 Nitratos y Nitritos.....	15
2.3.4 Nitrógeno amoniacal	16
2.3.5 Sólidos volátiles totales	17
CAPÍTULO III: Diseño metodológico	18
3.1 Equipos y reactivos utilizados	18
3.1.1 Equipos	18
3.1.2 Reactivos.....	18
3.2 Sustrato utilizado.....	18
3.3 Montaje experimental	19
3.3.1 Caracterización microbiológica con investigaciones relacionadas.....	19

3.4	Análisis físico-químico	20
3.4.1	Análisis de DQO.....	20
3.4.2	Análisis de pH.....	21
3.4.3	Análisis de sólidos suspendidos volátiles (SSV)	21
3.5	Diseño experimental	21
3.6	Evaluación del desarrollo de biomasa	23
3.7	Evaluación de la eficiencia del sistema	23
3.8	Procesamiento estadístico de la información	23
CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados		24
4.1	Evaluación del crecimiento de biomasa	24
4.2	Evaluación de la remoción de DQO	27
4.3	Estudio Comparativo	29
CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones		31
5.1	Conclusiones	31
5.2	Recomendaciones	32
Bibliografía		33

Introducción

La contaminación del agua es un problema que afecta tanto a la salud humana como a la biodiversidad animal, vegetal y recursos naturales. El aumento de la población ha causado que los vertidos de aguas residuales sean mayores, conllevando desafíos para las poblaciones y autoridades locales en lo que se refiere a su tratamiento y purificación (Marín et al., 2016). Desde el punto de vista de economía circular del agua, la búsqueda de soluciones de depuración constituye un elemento que aporta a la preservación y gestión de manera del agua de manera sostenible. El agua residual doméstica presenta principalmente presencia de materia orgánica en su composición, ya que proviene de desechos de alimentos, productos de limpieza, humanos, entre otros (Osorio et al., 2021). Esto conduce principalmente al aumento de la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en el agua, parámetros que ponen de manifiesto el contenido de materia orgánica en el agua residual.

En nuestro país, el 88 % del agua residual que se produce no es tratada. Acorde al AME-INEC, 164 de 221 municipios tratan el agua residual, es decir el 74% de los municipios tratan el agua residual, destacándose la región sierra con el 50 % de los municipios, mientras que en la costa el 31%. Sin embargo, solo el 22,3 % del agua que es usada entra a las plantas de tratamiento (INEC et al., 2022). Esto debido a que la mayoría del agua residual es descargada directamente al medio ambiente. La gestión del agua se ha centrado históricamente en la purificación y abastecimiento del agua potable, así como en los sistemas de alcantarillado. El problema principal es atribuido a la falta de presupuesto para este fin. Por tanto, en Ecuador, existe la necesidad de implementar tecnologías de tratamiento de bajo costo y fácil operación que permita el financiamiento y operación de estos sistemas de tratamiento.

La DQO constituye uno de los parámetros más importantes en el tratamiento y control de la calidad del agua residual doméstica. Representa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica presente en el agua residual, que incluyen compuestos biodegradables y no biodegradables. Es una medida rápida de la contaminación, ya que su análisis se puede completar en alrededor de 2 horas, por tanto, su empleo es factible y preciso. Emplear métodos apropiados para la remoción de la DQO garantiza la sostenibilidad de la operación de las instalaciones de tratamiento.

Entre la amplia diversidad de métodos de remoción de DQO del agua residual, destacan los métodos biológicos aerobios, anaerobios y sus combinaciones (Spellman, 2020). Los métodos biológicos ofrecen la ventaja de ser relativamente más baratos que los métodos fisicoquímicos, ya que las bacterias se reproducen consumiendo la propia carga orgánica contaminante que contiene el agua residual. Entre las tecnologías biológicas más aplicadas están los lodos activados, lagunas, humedales, filtros biológicos, sistemas adheridos de biopelícula, etc (Ferrer & Seco Torrecillas, 2008).

Los reactores de biopelícula de lecho móvil (rblm) conocido por sus siglas en inglés (mbr – moving bed biofilm reactor) se ha incrementado rápidamente en los últimos tiempos, debido a las ventajas que estos sistemas poseen, entre los que destacan la posibilidad de trabajar en un amplio rango de cargas orgánicas volumétricas, tamaños de reactor reducidos, menor posibilidad de taponamiento o baja transferencia de masa, entre otros (di Biase et al., 2019a; Wang et al., 2019). En los sistemas basados en biofilm, los microorganismos tienden a crear clústeres o colonias de microorganismos donde existe fácil acceso al alimento (Bassin et al., 2016). Para el soporte de los microorganismos se ha utilizado rocas, piedras, arena, suelo, madera, caucho, plástico entre otros (Raj Deena et al., 2022). El material de soporte debe proveer alta área superficial que permita el mayor crecimiento y adherencia microbiana, y que permita la mayor estabilidad de las colonias adheridas durante la operación del sistema (Hermansson et al., 2022a). Las tecnologías basadas en biofilm y particularmente en rblm tienen gran aplicación en sistemas de tratamiento municipales, dadas las ventajas que ofrecen versus otros sistemas.

La presente tesis aborda el estudio de reactores tipo rblm para el tratamiento de aguas residuales domésticas. La evaluación consiste en determinar el desempeño y crecimiento bacteriano en condiciones reales de carga orgánica y tiempo de retención hidráulico posibles en una planta de tratamiento. Esta evaluación permitirá conocer parámetros cinéticos de crecimiento y eficiencia de remoción de DQO, aspectos claves para el diseño y escalamiento de este tipo de tratamiento. En este sentido, la presente investigación se presenta en dos partes, un capítulo enfocado a determinar el crecimiento de biomasa tanto adherida, como suspendida, y otro capítulo destinado a la evaluación del desempeño de los reactores rblm en referencia a la eficiencia de remoción de DQO.

CAPITULO I: El problema de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

El tratamiento de aguas residuales provenientes de las poblaciones es un problema actual en nuestro país, varias ciudades incluidas Machala, no poseen un sistema efectivo de tratamiento de aguas residuales. La instalación y puesta en marcha de plantas de tratamiento es vital para proteger la salud pública y ecosistemas acuáticos. En el mismo sentido, es crucial la búsqueda de tecnologías factibles desde el punto de vista técnico y económico.

Uno de los principales contaminantes es la DQO, este parámetro es útil, ya que nos proporciona información acerca de la cantidad de materia orgánica que tiene el agua residual, y de esta forma controlar la eficiencia de los sistemas.

Los sistemas biológicos ofrecen la ventaja de ser eficientes y baratos, sin embargo, requieren de un componente técnico de manejo de alta cualificación, por lo que los estudios en sistemas reales determinan la eficiencia y factibilidad de los sistemas de tratamiento. Por otra parte, los tratamientos físicos-químicos son ampliamente aceptados para el tratamiento de la DQO de agua residual doméstica, sin embargo presentan la desventaja de utilizar altas cantidades de sustancias químicas en su operación.

1.2 Delimitación del problema

La presente investigación se limita a la evaluación del tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando una metodología biológica basada en el uso de materiales de soporte plásticos para la adherencia de biomasa, en la tecnología denominada reactores biológicos adheridos de lecho móvil. Estas evaluaciones son enfocadas al tratamiento secundario del agua residual doméstica proveniente de un punto específico de la Ciudad de Machala. Este estudio se conduce a conocer la cinética de producción de biomasa, la cinética de remoción de DQO en tres condiciones específicas de tiempo de retención hidráulico, en las condiciones del agua residual doméstica de esta ciudad.

1.3 Formulación del problema

La formulación del problema en la presente investigación está enfocada puntualmente en la determinación de los parámetros de operación de un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en reactores biológicos adheridos de cama móvil. Se evalúan tres tiempo de retención hidráulica diferentes en tres reactores de igual volumen, lo que conlleva al cambio de tres cargas orgánicas en los reactores. En cada caso se determinará la cinética de producción de biomasa, la cinética de remoción de DQO y el modelamiento específico para cada condición de alimentación.

1.4 Preguntas de investigación

La presente investigación se define con estas preguntas:

¿Cuál es la eficacia de un sistema de tratamiento biológico de biopelícula adherida de cama móvil en la remoción de DQO en aguas residuales domésticas bajo diferentes condiciones operativas?

¿Cómo afectan factores como la carga orgánica, la composición del sustrato y la presencia de inhibidores a la eficiencia del sistema?

1.5 Objetivo general

Aplicar un sistema de tratamiento biológico de biopelícula adherida de cama móvil para la remoción de DQO en aguas residuales domésticas

1.6 Objetivos específicos

- Implementar un sistema de reactores de biopelícula adherida de cama móvil
- Determinar el crecimiento bacteriano a diferentes cargas orgánicas volumétricas, tanto adherida como suspendida.
- Evaluar la eficiencia de remoción de DQO a diferentes tiempos de retención hidráulicos.

1.7 Declaración de las variables (operacionalización)

El presente trabajo de investigación se realizó mediante un diseño monofactorial, donde se varió en tres niveles la variable “tiempo de retención hidráulica”. Las variables dependientes fueron determinadas en el tiempo y fueron, concentración de sólidos suspendidos volátiles, concentración de DQO en el efluente. Las variables de control fueron la concentración de DQO en el afluente, la concentración de biomasa en el afluente, la concentración de nutrientes, temperatura, concentración de nutrientes y micronutrientes.

1.8 Justificación

La gestión eficiente de los recursos hídricos, particularmente el tratamiento de aguas residuales es crucial para la salud pública y la preservación de los ecosistemas. La presente investigación evalúa un proceso de tratamiento en particular a fin de determinar las condiciones de operación, previo al escalamiento del sistema. Uno de los mayores problemas del agua residual es la remoción de la DQO, por lo que la presente investigación se centra en este aspecto.

La aplicación de sistemas de tratamiento biológico adherido aprovecha la capacidad de los microorganismos de formar colonias adheridas a materiales de soporte, lo que consecuentemente resulta en altas concentraciones de biomasa disponible para la digestión de la materia orgánica o DQO presente. La carga orgánica que entra en el reactor juega un rol muy importante para la determinación de los parámetros de operación del sistema.

La evaluación de las condiciones de operación es necesaria para la comprensión y determinación del comportamiento del sistema en condiciones reales, lo que es necesario para el diseño y operación de sistemas reales.

1.9 Alcance y limitaciones

La presente investigación se enfocará en investigar la aplicación de un sistema biológico adherido o biopelícula, utilizando medios de soporte plásticos móviles utilizando como sustrato agua residual doméstica de la Ciudad de Machala.

El alcance de esta investigación incluirá los siguientes aspectos:

- Evaluación de la cinética de crecimiento de biomasa respecto a las cargas orgánicas volumétricas suministradas, mismas que están determinadas por el tiempo de retención hidráulico.
- Evaluación de la cinética de remoción de DQO respecto a las cargas orgánicas suministradas,

Por otra parte, la presente investigación tiene varias limitaciones que incluyen:

- Otros parámetros diferentes a la DQO no serán evaluados.
- La investigación se realizará con agua residual doméstica de una Ciudad específica, por lo que la robustez de la misma disminuye, la aplicación en otro tipo de aguas puede ser diferente.

No obstante, la presente investigación aporta con información valiosa y precisa al lugar de aplicación, por lo que los datos son útiles en la conducción de la problemática planteada.

CAPÍTULO II: Marco teórico referencial

2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales, definidas como aguas líquidas alteradas por la introducción de contaminantes debido al uso humano, industrial o agrícola, presentan una amplia gama de desafíos y preocupaciones. Estas aguas, que contienen desde materia orgánica hasta microorganismos patógenos, representan un grave riesgo para la salud pública y el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente (Lin et al., 2023). La gestión inadecuada de las aguas residuales plantea desafíos como la contaminación ambiental, la escasez de agua y el impacto negativo en la agricultura. Estos problemas son cada vez más urgentes de abordar, lo que ha generado un creciente interés en encontrar soluciones sostenibles y efectivas (Kehrein et al., 2020). En este sentido, el desarrollo de nuevas tecnologías y enfoques innovadores se ha convertido en una prioridad para mejorar el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales, en aras de proteger la salud humana y preservar el medio ambiente para las generaciones futuras.

2.1.1 Tipos de aguas residuales.

Las aguas residuales resultado del uso humano, industrial y agrícola, presentan desafíos significativos para la salud pública y el medio ambiente debido a su contaminación por una variedad de agentes contaminantes (Vargas et al., 2020). Esta contaminación plantea problemas como la degradación ambiental, la escasez de agua y riesgos para la salud humana, destacando la urgente necesidad de encontrar soluciones efectivas y sostenibles (Hermansson et al., 2022b). Además, la descarga de aguas residuales en los ecosistemas acuáticos afecta la calidad de los ecosistemas y reduce su capacidad para proporcionar recursos a las comunidades, con diferentes concentraciones de contaminantes, principalmente de origen industrial.

2.1.2 Agua residual doméstica.

Las aguas residuales domésticas, provenientes de actividades diarias como lavado, cocina y uso del baño, representan una fracción significativa del flujo total de aguas residuales. Estas aguas contienen una variedad de contaminantes, incluyendo materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos (-Benítez & Recalde-Torres, 2023). La fuente principal de estas aguas son los hogares urbanos y rurales, así como edificios comerciales e institucionales. Las

características físicas y químicas de las aguas residuales domésticas varían dependiendo de factores como la densidad de población, las prácticas de gestión de residuos y el nivel socioeconómico de la comunidad (DIAZ CUENCA et al., 2012). La gestión adecuada de las aguas residuales domésticas es crucial para prevenir la contaminación ambiental y proteger la salud pública, destacando la importancia de implementar sistemas de tratamiento eficientes y políticas de gestión sostenible del agua, esto debido a que el aumento de la urbanización y el crecimiento de la población urbana en América Latina ha exacerbado la generación de aguas residuales domésticas, lo que destaca la necesidad de desarrollar sistemas de gestión eficientes y sostenibles para su tratamiento y disposición adecuada (Boavida-Dias et al., 2022).

2.2. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales es un aspecto crucial para mitigar los efectos adversos de la contaminación en el medio ambiente y proteger la salud pública. A pesar de que las aguas residuales consisten principalmente en agua (99.9%) con una pequeña proporción de sólidos (0.01%), la concentración de estos sólidos es suficiente para desencadenar cambios biológicos, químicos y físicos que pueden contaminar el agua (García Gómez et al., 2011). Para abordar este problema, se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento, entre las cuales destacan los reactores aerobios y anaerobios, los estabilizadores y los lodos activos, siendo estos últimos ampliamente utilizados en la práctica (Escobar, D.; García, 2019)

Los lodos activos, una tecnología ampliamente aplicada en el tratamiento de aguas residuales, consisten en un agregado de nutrientes, sustancias extracelulares y, lo más importante, microorganismos generados durante el proceso de tratamiento. Estos microorganismos juegan un papel fundamental en la degradación de la materia orgánica, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y favoreciendo el reciclaje de nutrientes y materia orgánica (Leyva-Díaz et al., 2020). Sin embargo, es importante tener en cuenta que, si la concentración de nutrientes en el lodo es excesivamente alta, puede provocar una sobresaturación en el tratamiento del agua residual líquida.

Además, si estos lodos se utilizan como enmiendas en el suelo, pueden generar lixiviados que contaminan las aguas subterráneas (Boavida-Dias et al., 2022).

2.2.1 Tratamiento biológico de aguas residuales.

El tratamiento biológico de aguas residuales es un proceso fundamental para eliminar contaminantes orgánicos presentes en el agua mediante la actividad de microorganismos. Para implementar este proceso de manera efectiva, es esencial caracterizar minuciosamente las aguas residuales (Duque Sarango et al., 2018). Tradicionalmente, se han empleado medidas como el carbono orgánico total (COT), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) para esta caracterización (Ramirez-Rodriguez, 2023).

Existen varias tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales, que se pueden clasificar en aerobias y anaerobias, considerando el suministro o no de oxígeno en el sistema. Entre los métodos aerobios destacan las lagunas aireadas, los sistemas de lodos activos, y los sistemas de biopelícula adherida aerobia, mientras que entre las tecnologías anaerobias destacan las lagunas anaerobias, los sistemas UASB, y de biopelícula anaerobia (Orozco Jaramillo, 2014). Los diferentes sistemas o tecnologías presentan ventajas y desventajas, dependiendo del objetivo de tratamiento que esta en función de las características físico-químicas de las aguas residuales.

2.2.2 Sistema de biomasa adherida

En los sistemas de tratamiento con biomasa adherida, los microorganismos se adhieren a un medio de soporte que puede variar desde plástico hasta piedra, y otros materiales inertes. Esta técnica ofrece una solución eficaz para la eliminación de contaminantes en aguas residuales, ya que permite una mayor concentración de microorganismos en comparación con los sistemas convencionales (Duque Sarango et al., 2018). Además, dependiendo de las condiciones ambientales que rodean el medio de soporte, los sistemas de biomasa adherida pueden operar en condiciones aerobias o anaerobias, lo que amplía su versatilidad y aplicabilidad en una variedad de entornos de tratamiento de aguas residuales (Marina et al., 2014).

En los sistemas aerobios de biomasa adherida, como los biofiltros y los reactores de lecho móvil, los microorganismos utilizan el oxígeno disuelto en el agua para descomponer la materia orgánica y eliminar contaminantes. Estos sistemas son eficientes para tratar aguas residuales que contienen compuestos orgánicos solubles y

biodegradables (Medina Herrera et al., 2020). Por otro lado, los sistemas anaerobios de biomasa adherida, como los reactores de lecho fluidizado anaerobio, emplean microorganismos que no requieren oxígeno para su metabolismo, lo que los hace ideales para tratar aguas residuales con alta carga orgánica y concentración de sólidos suspendidos.

2.2.3 E.coli y su relación con soportes plásticos Kaldnes K1

La E. coli puede resistir materiales de soporte plásticos tipo Kaldnes K1 en reactores de biopelícula adherida en cama móvil (RBCM). La biopelícula desarrollada en los soportes Kaldnes K1 en reactores de biopelícula adherida en cama móvil (RBCM) está asociada a comunidades de bacterias, incluyendo la E. coli. Estas bacterias metabolizan los sustratos de energía y carbono presentes en el agua residual, crecen, se replican y producen polisacáridos extracelulares insolubles, acumulando así una comunidad de biopelículas viable (Guzman, 2022).

La resistencia de la E. coli a los materiales de soporte plásticos tipo Kaldnes K1 se debe a que estas bacterias pueden adherirse a los soportes y desarrollar una biopelícula. La biopelícula protege a las bacterias de los agentes químicos y físicos que podrían dañarlas, permitiendo que crezcan y se reproducen en el entorno del reactor (Pascual, 2014).

Además, la E. coli es una bacteria comúnmente utilizada en la investigación de biopelículas debido a su capacidad para adherirse a superficies y formar biopelículas. La resistencia de la E. coli a los materiales de soporte plásticos tipo Kaldnes K1 es una característica importante para el desarrollo de reactores de biopelícula adherida en cama móvil (RBCM), ya que permite que las bacterias crezcan y se reproducen en el entorno del reactor (Guzman, 2022).

2.2.4 Reactor biológico de leche móvil.

Los sistemas MBBR se caracterizan por tener un bajo contenido de sólidos en suspensión, lo que influye en su diseño y funcionamiento, que a menudo se basa en la tasa de carga superficial, dependiendo de la actividad de la biomasa adherida al soporte (Santos et al., 2020). Sin embargo, es importante destacar que las actividades de la biomasa en suspensión a menudo no se tienen en cuenta. En ciertas condiciones hidráulicas y de carga orgánica, la cantidad de sólidos en la fase cruda debido al crecimiento de incrustaciones o la suspensión puede ser significativa. Este

intercambio de biomasa entre las fases líquida y sólida resalta la necesidad de considerar las fracciones de biomasa suspendidas e inmovilizadas en el diseño y modelado de biopelículas (Boavida-Dias et al., 2022).

Recientemente, un estudio exhaustivo se llevó a cabo para investigar la remoción de materia orgánica en sistemas MBBR bajo diversas condiciones operativas. Este estudio proporcionó resultados esclarecedores sobre las actividades heterótrofas de las fracciones de biomasa libre y adherida, así como su contribución a la eliminación total de la demanda química de oxígeno (DQO) en diferentes tiempos de retención hidráulica. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender la dinámica de la biomasa en sistemas MBBR y su papel en el tratamiento efectivo de aguas residuales.

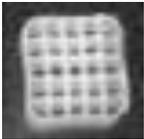
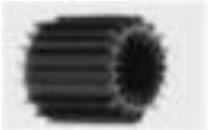
Algunas de las características de los sistemas mbbbr más importantes son:

- Alta capacidad de carga orgánica: Las biopelículas adheridas tienen una alta densidad de microorganismos, lo que les permite alcanzar tasas de remoción de materia orgánica significativas en un espacio reducido (Mahto & Das, 2022).
- Resistencia a choques de carga: La estructura de las biopelículas proporciona una protección adicional a los microorganismos frente a fluctuaciones bruscas en la carga orgánica, lo que contribuye a una mayor estabilidad del proceso de tratamiento (Hermansson et al., 2022b).
- Bajo requerimiento de energía: Los sistemas MBBR requieren bajos niveles de energía para su operación y mantenimiento, lo que los hace económicamente viables y sostenibles a largo plazo (Leyva-Díaz et al., 2020).

Uno de los aspectos clave en los sistemas MBBR está relacionado con las características de los materiales de soporte a emplear. Estos materiales deben proporcionar las condiciones para que la biomasa bacteriana se adhiera en la superficie de estos, forme colonias y ecosistemas donde exista simbiosis y por tanto se de lugar el tratamiento de aguas residuales.

Varios tipos de materiales han sido propuestos, patentados y comercializados. La Tabla 1, muestra varios de los materiales de soporte utilizados con sus características más relevantes:

Tabla 1*Materiales de soporte utilizados en reactores MBBR.*

Identificación	Área superficial (m ² /m ³)	Diámetro nominal	Altura nominal	Forma
AnoxKaldnes K1	500	7,1	7,2	
AnoxKaldnes K2	350	15	15	
AnoxKaldnes F3	200	46	37	
Headworks AC450	402	-	-	
Biowater technology BWT 15	828	-	-	
Warden Biomedia Bioball	220	-	-	
GEA Random media BCN 020	610	-	-	

Fuente: (di Biase et al., 2019a)

2.2.5 Niveles de tratamiento.

Dentro de un proceso de tratamiento de aguas residuales, es crucial establecer niveles de tratamiento que guíen la selección de equipos, acciones y ejecuciones en cada área específica. Además, es esencial considerar los objetivos y enfoques del sector al aplicar el sistema de tratamiento (di Biase et al., 2019). Dada la diversidad de operaciones y procesos involucrados en el tratamiento de aguas residuales, se pueden identificar varios niveles de tratamiento, cada uno con sus propias funciones y alcances:

- **Pretratamiento o Tratamiento Preliminar:** Esta etapa implica la eliminación de materiales grandes y sólidos gruesos del agua residual, así como la separación de materiales flotantes y sedimentables (Belzona, 2010). El objetivo principal es proteger equipos y sistemas posteriores de daños y obstrucciones.
- **Tratamiento Primario:** En esta fase, se lleva a cabo la separación física de sólidos suspendidos y la reducción de la carga orgánica mediante procesos como la sedimentación y la filtración. El tratamiento primario busca eliminar la materia orgánica y los sólidos en suspensión gruesos del agua residual.
- **Tratamiento Secundario:** Aquí se emplean procesos biológicos para descomponer la materia orgánica disuelta y suspendida en el agua residual. Los microorganismos aeróbicos o anaeróbicos son utilizados para metabolizar los contaminantes restantes, convirtiéndolos en productos más estables y menos perjudiciales (Peña et al., 2018).

Cada nivel de tratamiento desempeña un papel crucial en la purificación del agua residual y la protección del medio ambiente. La selección adecuada y la combinación de estos niveles dependen de factores como la composición del agua residual, los requisitos de descarga y los objetivos de tratamiento específicos (Medina Herrera et al., 2020).

2.3. Análisis de calidad de agua

En el análisis de calidad del agua, es fundamental considerar una serie de parámetros para garantizar la diversidad y la salud de los ecosistemas acuáticos. Entre estos parámetros, el pH juega un papel crucial, ya que nos indica si las aguas residuales son

ligeramente ácidas o alcalinas, lo que puede afectar tanto a los organismos acuáticos como a los procesos químicos y biológicos en el agua. Además, es esencial medir la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), según lo establecido por las normativas ambientales, como el TULSMA (Texto Único de Legislación Secundaria en Materia Ambiental) (Osorio Rivera et al., 2021).

Dentro de todos los factores es donde se integran estos importantes en el análisis de calidad del agua, como la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo), la presencia de metales pesados y contaminantes emergentes, así como la evaluación de la calidad bacteriológica del agua mediante la medición de indicadores microbiológicos (DIAZ CUENCA et al., 2012).

2.3.1 Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO5).

Los sistemas MBBR se caracterizan por tener un bajo contenido de sólidos La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) es un parámetro crucial en el análisis de la calidad del agua, ya que determina la cantidad relativa de oxígeno requerida por las aguas residuales, efluentes y cuerpos de agua contaminados (Ramirez-Rodriguez, 2023). Este análisis encuentra su aplicación principal en la medición de las cargas de residuos en plantas de tratamiento de aguas residuales, así como en la evaluación de la eficiencia de eliminación de DBO de dichas plantas.

La prueba de DBO5 implica la medición del oxígeno molecular consumido durante un período de incubación específico, generalmente de 5 días (método 5210 B), aunque también se pueden realizar mediciones después de incubaciones más prolongadas (método 5210 C) o durante un consumo continuo de oxígeno (método 5210 D). Otros métodos de DBO, descritos en diferentes fuentes, pueden utilizar diferentes períodos de incubación y condiciones específicas de siembra, dilución e incubación para simular las condiciones del cuerpo receptor de agua (Saidulu et al., 2021). Estos métodos proporcionan una estimación del impacto ambiental de las aguas residuales y el drenaje, lo que es fundamental para la gestión adecuada de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente (Marina et al., 2014).

Además de su importancia en el monitoreo de la calidad del agua, la DBO5 también se

utiliza en la evaluación de la carga orgánica en cuerpos de agua naturales y en la planificación y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales (di Biase et al., 2019b). Una comprensión completa de la DBO5 y su significado en términos de calidad del agua es esencial para garantizar la protección de los ecosistemas acuáticos y la salud pública.

2.3.2 Demanda química de oxígeno (DQO).

Se define como la cantidad de un oxidante específico que reacciona con una muestra bajo condiciones controladas, expresando la cantidad de oxidante consumido en términos de su equivalencia en oxígeno. En los métodos 5220 B, C y D, se utiliza el ion dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) como oxidante, el cual se reduce a ion crómico (Cr^{3+}) durante el proceso de oxidación (Achparaki et al., 2012). Aunque tanto los componentes orgánicos como inorgánicos de la muestra pueden ser sujetos a oxidación, en la mayoría de los casos, el interés principal recae en la materia orgánica debido a su predominancia y relevancia ambiental. La DQO es una herramienta invaluable en el monitoreo y control de la calidad del agua, proporcionando información crucial sobre la carga de materia orgánica y la contaminación presente en las muestras (Saidulu et al., 2021).

Es importante señalar que, para medir específicamente la DQO orgánica o inorgánica se toman medidas adicionales. La DQO es una prueba definida, sin embargo, el grado de oxidación de la muestra puede variar según el tiempo de digestión, la concentración de reactivo y la propia concentración de DQO de la muestra (Kehrein et al., 2020). Estos factores pueden influir en los resultados obtenidos y, por lo tanto, deben ser considerados cuidadosamente durante el proceso de análisis.

2.3.3 Nitratos y Nitritos.

Los compuestos nitrogenados, como el nitrito (NO_2^-) y el nitrato (NO_3^-), son componentes solubles cuya estructura molecular incluye nitrógeno y oxígeno. En el medio ambiente, el nitrito tiende a convertirse fácilmente en nitrato, lo que explica por qué el nitrito es raramente detectado en aguas subterráneas (García, B; López, 2020). Los nitratos desempeñan un papel crucial en el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, se utilizan ampliamente como fertilizantes, lo que conlleva a su producción a gran escala

en la industria.

Existen dos principales fuentes de contaminación natural del agua con compuestos nitrogenados: la contaminación puntual y la contaminación difusa. La contaminación puntual proviene de actividades industriales, agrícolas y urbanas, tales como el vertido de aguas residuales industriales y municipales, así como la liberación de desechos orgánicos de explotaciones ganaderas y fugas de vertederos (Ávila & Sansores, 2003). Por otro lado, la contaminación difusa, asociada principalmente con la actividad agronómica, resulta de la aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados, lo que conlleva a la escorrentía superficial y la lixiviación de nitratos hacia cuerpos de agua cercanos (Cabrera Molina et al., 2003).

2.3.4 Nitrógeno amoniacal.

El nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{-N}$) es una forma común de nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales y es de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales debido a su potencial para causar impactos ambientales adversos. El amoníaco se forma principalmente a partir de la degradación de la materia orgánica nitrogenada y de la hidrólisis de compuestos nitrogenados, como la urea y las proteínas, presentes en las aguas residuales (González L., 2018).

En el contexto del tratamiento de aguas residuales, la presencia de nitrógeno amoniacal puede ser problemática debido a su toxicidad para la vida acuática y su capacidad para formar subproductos nocivos durante el proceso de desinfección (Fernandez, E; Monforte, 2019). Por lo tanto, su eliminación efectiva es crucial para cumplir con los estándares de calidad del agua y proteger el medio ambiente acuático.

La caracterización del nitrógeno amoniacal en el tratamiento de aguas residuales implica la medición de su concentración en las muestras de agua y el seguimiento de su comportamiento a lo largo de los procesos de tratamiento. Esto se logra mediante técnicas analíticas, como la espectrofotometría y la cromatografía, que permiten cuantificar la cantidad de amoníaco presente en las muestras (Depez, 2021). Los estudios científicos sobre este tema suelen centrarse en el desarrollo y la evaluación de tecnologías de tratamiento específicas para la eliminación de nitrógeno amoniacal, como la nitrificación y la desnitrificación. La nitrificación es un proceso biológico en el que las

bacterias oxidan el amoníaco a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-), mientras que la desnitrificación implica la reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso (N_2) o óxido nitroso (N_2O) por bacterias anaerobias (González L., 2018).

2.3.5 Sólidos volátiles totales.

Los sólidos presentes en el agua, tanto suspendidos como disueltos, juegan un papel crucial en la calidad del agua potable, superficial e industrial, así como en las aguas residuales domésticas e industriales. Estos sólidos pueden afectar adversamente la calidad del agua de varias maneras. Por ejemplo, altas concentraciones de sólidos disueltos pueden conferir un sabor deficiente al agua potable y provocar reacciones fisiológicas negativas en los consumidores (Hermansson et al., 2022b). Para garantizar la seguridad y la aceptabilidad del agua potable, se establece un límite recomendado de 500 mg/L para sólidos disueltos. Además, el agua altamente mineralizada puede no ser adecuada para numerosas aplicaciones industriales. Por otro lado, los sólidos en suspensión pueden afectar la estética del agua, volviéndola inadecuada para actividades recreativas como la natación (Matinez, 2020).

El análisis de partículas es una herramienta esencial para monitorear los procesos de tratamiento de agua y aguas residuales, así como para evaluar el cumplimiento normativo. En este contexto, el análisis de sólidos volátiles totales (SVT) adquiere particular relevancia. Los SVT representan la cantidad de materia orgánica, tanto inorgánica como orgánica, que puede volatilizarse mediante calcinación a una temperatura específica. Se realiza a una temperatura de $550^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ durante un período de tiempo controlado de 15 a 20 minutos, este análisis proporciona información crucial sobre la composición y la concentración de materia orgánica en muestras de agua y aguas residuales (Argandoña, L; Ramón, 2013).

CAPÍTULO III: Diseño metodológico

3.1 Equipos y reactivos utilizados

3.1.1 Equipos

- Balanza analítica de 0.1 mg de precisión.
- Mufla
- pH metro Ohaus
- Fotómetro Hach DR-1900
- Reactor para digestión Hach
- Equipo Oxitop de Velp

3.1.2 Reactivos

- Reactivos de DQO rango 0-1500 mg/L (Hach)
- Estándares de calibración de pH (4, 7, 10)

3.2 Sustrato utilizado

En la presente investigación se utilizó agua residual doméstica recolectada en la Ciudad de Machala, del canal “El Macho”, en un punto particular ubicado en las coordenadas: 3°15'11.7"S 79°56'32.0"W. La ubicación geográfica del lugar de toma de agua residual doméstica cruda para ser evaluada se muestra en la Figura 1.

Se recolectó 20 L de agua residual cada dos días y fue transportada hasta el laboratorio de Aguas Residuales de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Técnica de Machala. El agua fue colocada en un recipiente reservorio y una muestra fue tomada cada vez para analizar la concentración de DQO, pH y SVT de la misma.

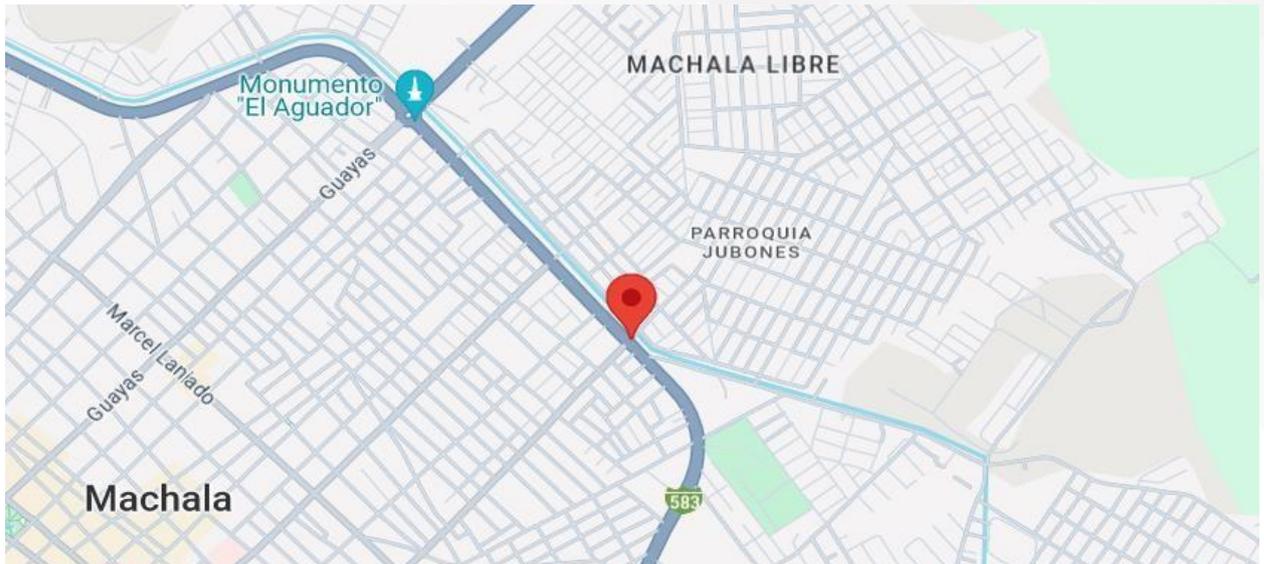


Figura 1. Ubicación geográfica del punto de suministro de agua residual doméstica

3.3 Montaje experimental

Los experimentos fueron llevados a cabo en reactores que funcionaron simultáneamente bajo condiciones de caudal diferentes, acorde al diseño experimental aplicado. Fueron implementados reactores de acrílico de 20 Litros de capacidad, que acomodan una zona de alimentación, zona de reacción y crecimiento bacteriano y zona de sedimentación fueron alimentados con agua residual con la ayuda de una bomba peristáltica. Para el suministro de aire fue utilizado un compresor, equipado con un caudalímetro y difusores de aire. Los materiales de soporte utilizados ocuparon el 40% del volumen del reactor.

3.3.1 Caracterización microbiológica con investigaciones

relacionadas

Se realizó un estudio relacionado en la misma zona, con el tema: “Plan de manejo para la recuperación ambiental del estero El Macho, cantón Machala” de Alfaro André Andrade Mera y Wilman Vinicio Carrión Chamba.

Tabla 2*Caracterización microbiológica de estero El Macho según Mera y Carrión*

Tipo de microorganismos	Método de análisis	Resultado
<i>Escherichia coli</i>	Método del Número Más Probable (NMP)	Se utilizaron tubos con lactosa para detectar coliformes fecales, principalmente <i>E. coli</i> , mediante la observación de la producción de gas. Este resultado indicó la contaminación fecal del agua analizada, lo cual sugiere riesgos potenciales para la salud asociados con el consumo o uso de esa agua

3.4 Análisis físico-químico

3.4.1 Análisis de DQO

La determinación de DQO consiste en la digestión de la muestra previo al análisis fotométrico. Esta determinación se realizó usando el método Hach 8000. Luego de recolectar la muestra, se toma 2 mL previamente filtrada mediante un filtro de jeringa. Estos 2 mL son depositados en un vial Hach de rango de medición 0 a 1500 mg/L (rango alto). Los viales con muestra son digeridos en un termo reactor a 150 °C durante 2 horas. Luego de enfriar se procede a la medición en el fotómetro Hach DR-1900. Para esto se debe tener especial cuidado en la limpieza externa del vial previo a introducirse en el fotómetro.

En caso de que la concentración de DQO de la muestra sea mayor a la del rango de medición (0 a 1500 mg/L) se debe realizar diluciones. La siguiente ecuación 1 debe ser aplicada:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 V_2$$

Ecuación 1

Dónde:

C₁: Concentración inicial (mg/L)V₁: Volumen inicial (mL)C₂: Concentración final deseada (mg/L)V₂: Volumen a preparar (mL)

3.4.2 Análisis de pH

El pH del agua residual antes y durante los experimentos fue determinado como medida de control. Para su medida se utilizó un pH metro Ohaus, el mismo que se calibra diariamente acorde a las indicaciones del fabricante.

3.4.3 Análisis de sólidos suspendidos volátiles (SSV)

La determinación de sólidos suspendidos volátiles (SSV) se realizó siguiendo el método 8276 del Standard Methods (REF), mismo que consiste en procedimientos gravimétricos secuenciales con el objetivo de eliminar la materia orgánica de la muestra. Para este análisis se utiliza cápsulas de porcelana previamente taradas e identificadas. Un volumen de 1000 mL de muestra debe ser filtrada con un filtro de 0.44 μm de apertura de poro, el residuo sólido se somete a secado por 4 a 5 horas a una temperatura de 105 °C, luego se pasa a desecador por 30 min y se pesa la muestra. La muestra seca se la coloca en una mufla precalentada a 550 °C por 30 minutos, se deja enfriar en un desecador y se pesa nuevamente. Con los datos obtenidos se procede al cálculo en mg/L de SSV. La siguiente ecuación 2 es utilizada para el cálculo de la concentración de SSV.

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(B - C) * 1000 \left(\frac{mg}{g} \right)}{V} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

B: Peso de la muestra secada (g)

C: Peso de la muestra calcinada (g)

V: Volumen de muestra (L)

3.5 Diseño experimental

La presente investigación se enfoca en determinar el desempeño de reactores de biopelícula adherida en cama móvil (rbcM), utilizando materiales de soporte plástico Kaldness K1. La principal variable independiente es la variación del caudal, lo que repercute directamente en el tiempo de retención hidráulica y carga orgánica volumétrica del sistema. Es decir, al variar el caudal, se varía el tiempo de retención

hidráulica y la carga orgánica volumétrica, acorde a la ecuación 4 y 5. El esquema del biorreactor modelo se muestra en la Figura 2.

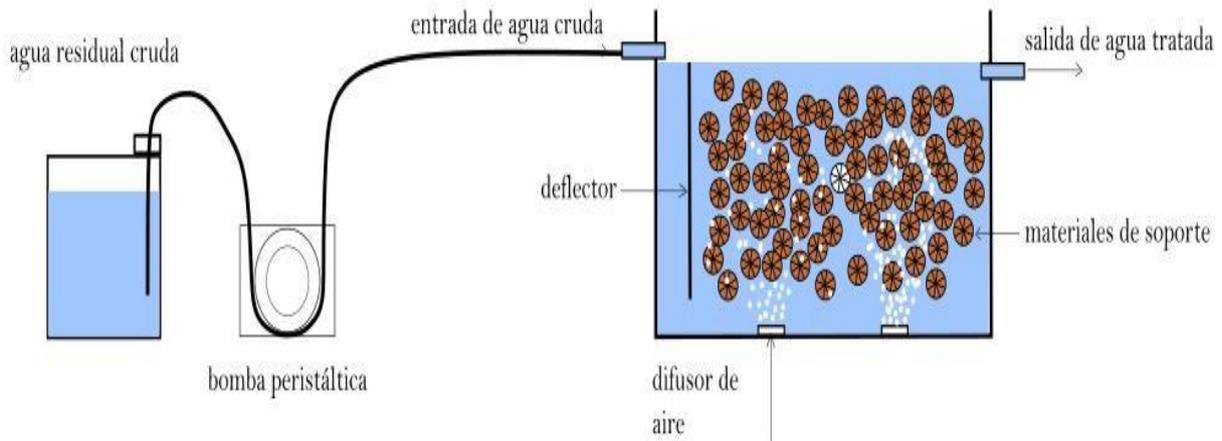


Figura 2. Esquema del biorreactor utilizado

Se realizaron experimentos monofactoriales en los cuales se varió el caudal que ingresó en el sistema en tres niveles. Los resultados son cuantificados en el tiempo. Los experimentos fueron realizados por duplicado. La Tabla 3, muestra el diseño experimental aplicado.

Tabla 3

Diseño experimental aplicado

Experimento	Caudal (L/h)	Tiempo de retención	
		hidráulica (h)	Carga orgánica volumétrica (kg/m ³ .d)
B1	3.33	6.00	2.05
B2	5.00	4.00	3.07
B3	10.00	2.00	6.14

El tiempo de retención hidráulica (TRH) y la carga orgánica volumétrica (COV) fueron calculados mediante las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

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

Ecuación 3

$$COV = \frac{C_{DQO} * Q}{V}$$

Ecuación 4

Dónde:

V = volumen del reactor en Litros.

Q = caudal en L/h.

TRH = tiempo de retención hidráulica en horas.

COV = carga orgánica volumétrica en kg/m³.d

3.6 Evaluación del desarrollo de biomasa

La biomasa en el sistema se reproduce y acumula en el reactor ya sea por adherencia en los soportes y suspendida. La concentración total de biomasa es medida a lo largo del tiempo para determinar cuál es la cantidad de SSV máxima alcanzada en cada condición experimental. Para realizar la cuantificación de biomasa suspendida, el análisis es basado en el capítulo 3.4.3 de este documento. Para la determinación de la biomasa adherida en los medios de soporte, se determina recolectando una cantidad específica de materiales de soporte, de los cuales se extrae la biomasa con agua destilada y se procede al análisis de SSV acorde al capítulo 3.4.3. Los resultados de SSV total, se calculan tomando en cuenta el total de materiales de soporte en el reactor.

3.7 Evaluación de la eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema está representada por la eficiencia de remoción de DQO alcanzada, la misma que depende de los parámetros operacionales del sistema. La eficiencia de remoción de DQO es determinada en el tiempo, mediante análisis semanales de DQO y calculada mediante la siguiente ecuación 5.

$$Eficiencia (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

3.8 Procesamiento estadístico de la información.

Para determinar diferencias significativas entre tratamientos se realizarán análisis ANOVA de una vía, particularmente para determinar diferencias entre el crecimiento de biomasa. Se utilizó el software estadístico IBM SPSS Statistics v26.0.0.0.

CAPÍTULO IV: Análisis e interpretación de resultados

4.1 Evaluación del crecimiento de biomasa

La biomasa representada como la concentración de SSV en g/L en los biorreactores se presenta en dos formas, i) adherida y ii) suspendida. La biomasa adherida corresponde a las bacterias que se han depositado en los materiales de soporte plásticos. La biomasa suspendida corresponde a las bacterias que se encuentran presentes en el lecho acuoso en forma de flóculos biológicos. La suma de las dos fracciones corresponde a la biomasa total que realiza el proceso de síntesis de la DQO o depuración de la contaminación representada como DQO.

Los reactores evaluados a diferentes caudales, por tanto, diferentes tiempos de retención hidráulica y cargas orgánicas volumétricas (Figura 3) muestran la concentración de biomasa tanto adherida, como suspendida. La mayor concentración de biomasa fue notada en el reactor B3 con 4,8 g/L, seguido del reactor B2 con 4,7 g/L y el reactor B3 3,9 g/L. En relación con la distribución de la biomasa adherida o suspendida en los materiales de soporte, se observó igualdad en la cantidad adherida en los tres reactores, pero una variación en la cantidad suspendida, principalmente se notó una menor formación en el reactor B1.

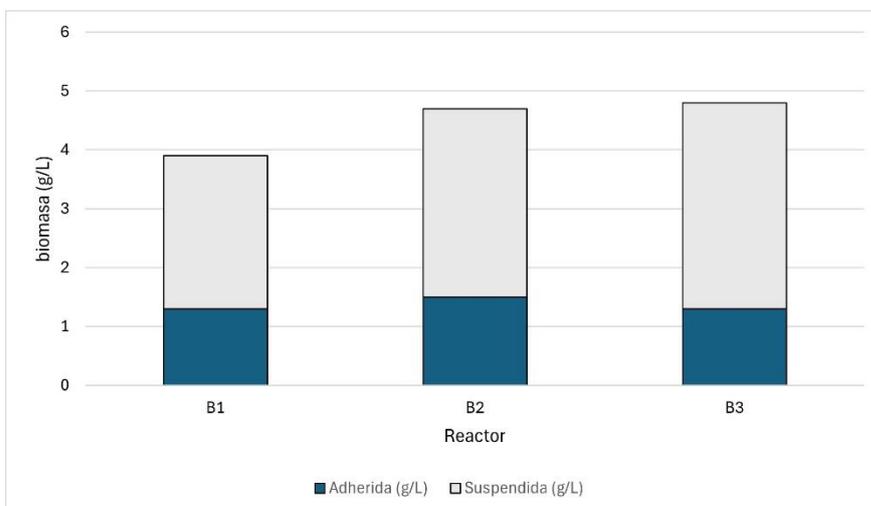


Figura 3. Concentración de biomasa (SSV) en los biorreactores evaluados

Tabla 4

Análisis ANOVA de crecimiento de biomasa total en los reactores evaluados

ANOVA		
	F	p-valor
Entre grupos	89,374	,000
Dentro de grupos		
Total		

La Tabla 4 muestra el análisis comparativo de los resultados de biomasa total de los tres reactores evaluados, donde se muestra que acorde al valor p, si existen diferencias significativas entre los resultados de los experimentos.

Paralelamente, se realizó un gráfico de cajas y bigotes, en el que se visualiza en donde están las diferencias entre los tratamientos. La Figura 4 contiene las cajas y bigotes de los tratamientos.

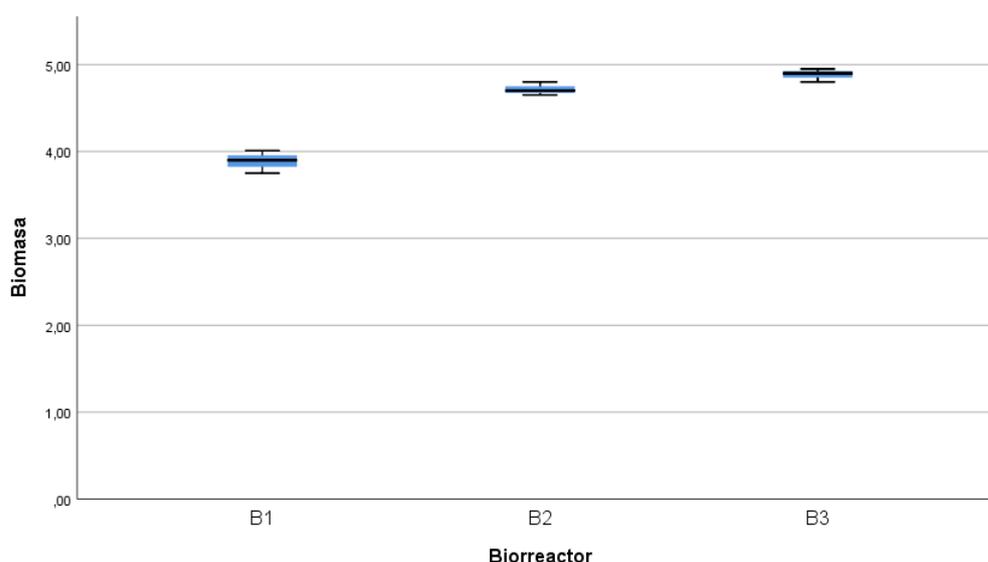


Figura 4. Diagrama de cajas y bigotes de comparación de biomasa total de los biorreactores evaluados.

En el mismo sentido la Tabla 5, correspondiente a un análisis Tukey se puede observar las comparaciones de todos los tratamientos realizados. Se observa que el reactor B1 presenta diferencias significativas con un nivel de significancia de 0,05,

respecto a los reactores B2 y B3 (p-valor menor que 0,05). Los resultados de los experimentos en el reactor B2 es estadísticamente diferente que el reactor B1, y no presenta diferencias estadísticamente significativas con el reactor B3. Es decir el reactor B1 es diferente a B2, y los resultados de los experimentos de los reactores B2 y B3 son estadísticamente iguales.

Tabla 5

Análisis Tukey de comparaciones múltiples intragrupos.

HSD Tukey		
(I) Biorreactor	(J) Biorreactor	p-valor
B1	B2	,000
	B3	,000
B2	B1	,000
	B3	,173
B3	B1	,000
	B2	,173

Nota. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05

La distribución porcentual de biomasa adherida y suspendida en los biorreactores evaluados es mostrada en la Figura 4. Se observa que en los tres reactores la distribución es similar, pero con una ligera concentración mayor en la biomasa suspendida en el biorreactor B3. Aproximadamente el 30% corresponde a biomasa adherida a los medios de soporte, mientras que el 70% corresponde a biomasa suspendida en la fase acuosa del reactor.

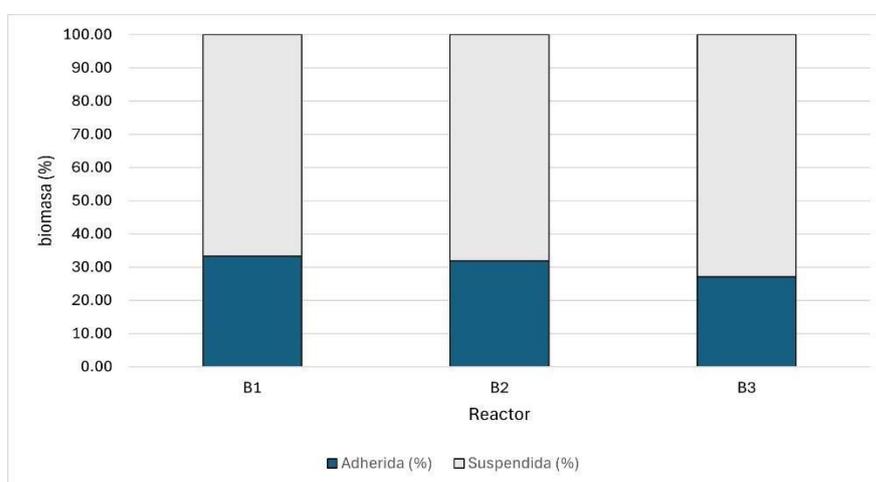


Figura 5. Concentración de biomasa (%) en los biorreactores evaluados

El desarrollo de la biomasa en forma de biofilm está influenciado por varios procesos que incluyen la adsorción y desorción de microorganismos en la superficie sólida del material de soporte y en la propia superficie de los microorganismos que a lo largo del tiempo van formando colonias (Espinoza et al., 2019). El material de soporte utilizado para el crecimiento de biomasa en el presente estudio correspondió a material desarrollado por Veolia AnoxKaldnes K1 (Figura 6). Las características de este material son: diámetro: 7,1 cm, altura nominal 7,2 mm y área superficial de 500 m²/m³ (di Biase et al., 2019a). Estas condiciones, junto con las estrías del material, permitió la adherencia de biomasa bacteriana en los materiales de soporte.



Figura 6. Material de soporte con biomasa adherida

4.2 Evaluación de la remoción de DQO

La evolución en la concentración de la DQO fue medida a lo largo de 20 días, a fin de establecer el comportamiento bajo los distintos regímenes de caudal, por tanto, a distintos tiempos de retención hidráulica y cargas orgánicas volumétricas. La figura 7 muestra el comportamiento de la DQO para los tres reactores evaluados.

La carga orgánica volumétrica, expresada en kg de DQO por unidad de volumen y tiempo, es el parámetro fundamental que expresa cuanta biomasa entra al sistema. La evaluación de la eficiencia de remoción a distintas COVs determina el rendimiento de un sistema particular, y consecuentemente determina la cantidad de biomasa máxima que un sistema puede tratar.

En el presente estudio es notorio que el biorreactor B1, con menor COV presentó

mejores resultados en términos de la remoción de DQO, seguidos de los reactores B2 y B3. En general en el término de 12 días se produjo la estabilización en la remoción de la DQO, es decir se alcanzó la estabilidad debido al máximo crecimiento de biomasa en los sistemas.

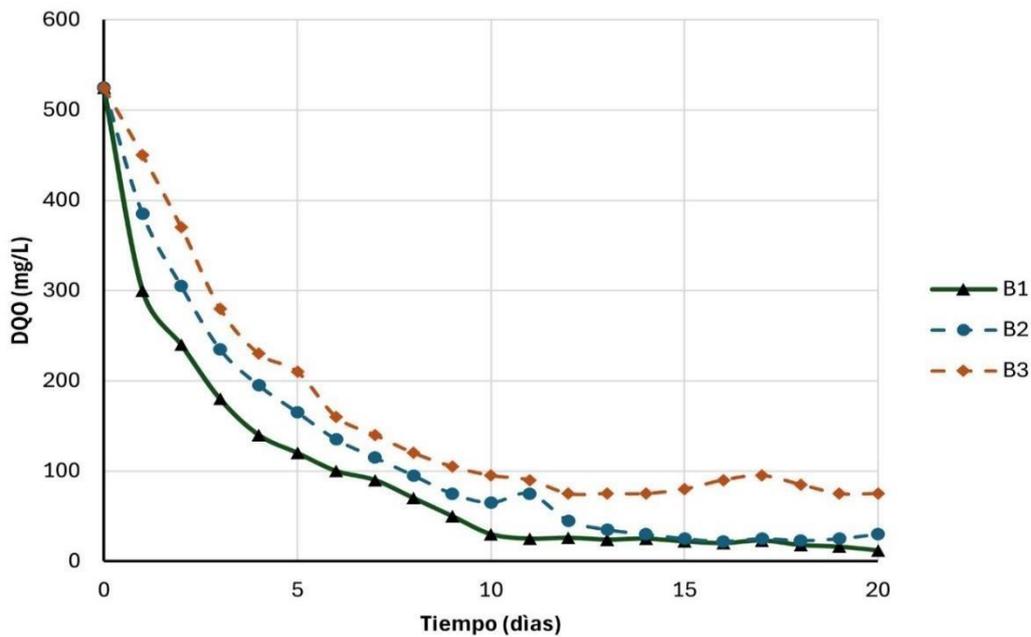


Figura 7. DQO removida a diferentes flujos

Por otra parte, la Figura 8 muestra la eficiencia de remoción de DQO de los reactores evaluados. Esta visualización en % se realiza con el fin de tener una observación alternativa que permita evaluar la eficiencia de remoción en cantidades relativas.

El mejor desempeño fue mostrado por el reactor B1, mismo que alcanzó el 97% de eficiencia de remoción de DQO, seguido por el reactor B2 con el 94% y el reactor B3 con el 85.7%.

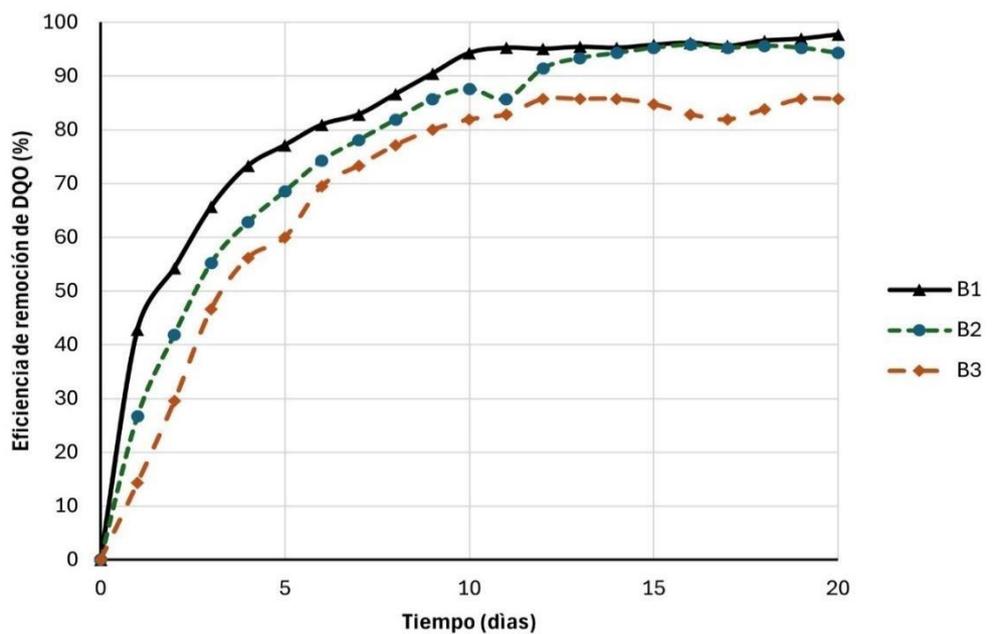


Figura 8. Eficiencia de remoción de DQO

El reactor B1 muestra los mejores resultados en términos de eficiencia de remoción de la DQO. Sin embargo, los resultados de crecimiento de biomasa total (Fig. 2) demostró que el biorreactor B1 mostró menor cantidad de biomasa, respecto a los reactores B2 y B3, pero con una relativa igualdad en la biomasa adherida. Al contrastar los resultados de biomasa adherida y la eficiencia de remoción se puede notar que la biomasa adherida en el biorreactor 1 fue suficiente para lograr remociones de DQO de hasta el 97% de eficiencia.

En términos generales, los sistemas de biomasa adherida evaluados para el agua residual doméstica de la Ciudad de Machala funcionan con alta eficiencia para los COVs evaluados, siendo el mejor las condiciones evaluadas en el experimento o biorreactor B1 con una COV de 2.05 kg DQO/m³.d que corresponde a un tiempo de retención hidráulico de 6 horas y caudal de 3.33 L/h. Aunque los resultados de los otros biorreactores evaluados B2 y B3 son menos favorables en comparación del biorreactor B1, estos son eficientes y pueden ser empleados. Desde el punto de vista de operación, se puede considerar que esta configuración de este sistema para esta agua residual puede trabajar eficientemente entre COVs de 2 a 6 kg DQO/m³.d.

4.3 Estudio Comparativo

Este análisis comparativo resalta la efectividad de los sistemas de biopelícula para el

tratamiento de aguas residuales, especialmente los métodos empleados en el estudio propio y el artículo 1. El estudio propio se destaca particularmente por su capacidad para lograr una alta eficiencia de remoción con tiempos de retención más cortos y por su enfoque versátil en la evaluación de diferentes condiciones operativas. Estos hallazgos proporcionan valiosa información para la selección y optimización de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en diversas aplicaciones.

Tabla 6

Análisis comparativo de estudios relacionados y esta investigación

Tipo de muestra	Caudal (L/h)	Retención hidráulica (h)	Tipo de soporte	Eficiencia de remoción	Referencia
Se utilizó un efluente proveniente de una planta de tratamiento de soja, con un alto contenido de carbohidratos y proteínas. Este efluente se diluyó con agua potable para incrementar lentamente la carga de DQO	15 L/h	8 horas	Se utilizaron Biodiscos, donde el medio de soporte está en rotación para favorecer la aplicación homogénea del agua a tratar.	96%	Sagrario, G. (2015)
La muestra utilizada fue de agua residual doméstica del PTAR del distrito de Jequetepeque, Provincia de Pacasmayo, Departamento La Libertad. La muestra estuvo constituida por 36 litros, obtenidos de la poza de oxidación de PTAR Jequetepeque	10 L/h	El tiempo de retención hidráulica se menciona en el contexto del tiempo de residencia del tratamiento con <i>Trichoderma</i> sp., siendo de 30 días para el experimento en condiciones de laboratorio	El soporte utilizado fue soporte sintético de fibra de vidrio	70%	García, K., & Valera, L. (2019)
GAgua residual doméstica cruda	Los caudales utilizados fueron 3.33 L/h, 5.00 L/h y 10.00 L/h.	Los tiempos de retención hidráulica correspondientes fueron 6.00 horas, 4.00 horas y 2.00 horas, respectivamente.	Materiales de soporte plásticos tipo Kaldness K1 en reactores de biopelícula adherida en cama móvil (RBCM)	97%	Zambrano, C. (2024)

CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la presente investigación se evaluó la factibilidad de aplicar un sistema de tratamiento biológico basado en biopelícula adherida de cama móvil para la remoción de DQO de agua residual doméstica de la ciudad de Machala, Ecuador. Durante los experimentos, que consistieron en variar el caudal en tres niveles para cada uno de los tratamientos, y con la variación del caudal se provocó la variación de la carga orgánica volumétrica, se evidenció la factibilidad de usar estos sistemas para las COVs propuestas.

Acorde a los objetivos planteados, se logró establecer varias conclusiones:

- Se logró implementar los reactores de escala laboratorio, utilizando materiales de soporte plásticos Kaldness K1, con un 30% de uso de volumen de reactor.
- Se monitoreo durante 30 días el desarrollo de la biomasa dentro del reactor, tanto adherida, como suspendida, donde se determinó que la mayor concentración de biomasa, expresada en SSV, fue para el reactor B3.
- Se logró establecer la eficiencia de remoción de DQO para los tres caudales, e intrínsecamente las 3 COVs, donde se evidenció que el mejor resultado fue para el reactor B1, en el cual se suministró la menor COV.

5.2 Recomendaciones

Del presente trabajo surgen recomendaciones para siguientes investigaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales basados en reactores biológicos adheridos de cama móvil, las cuales son:

- Evaluar la remoción de Nutrientes.
- Evaluar la factibilidad de trabajar en sistemas anaerobios y sistemas combinados anaerobios, aerobios.
- Realizar evaluaciones con COVs más altas que permitan reducir el tiempo de retención hidráulica y por tanto reducir el tamaño de los reactores.
- Evaluar la producción y manejo de lodos provenientes del tratamiento.
- Evaluar la factibilidad económica de implementar estos sistemas a escalas reales.

Bibliografía

- Achparaki, M., Thessalonikeos, E., Tsoukali, H., Mastrogianni, O., Zaggelidou, E., Chatzinikolaou, F., Vasilliades, N., Raikos, N., Isabirye, M., Raju, D. V. N., Kitutu, M., Yemeline, V., Deckers, J., Additional, J. P., & Access, O. (2012). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 % . *Intech, i(tourism)*, 13.
- Argandoña, L; Ramón, M. (2013). *Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia colón, cantón portoviejo, provincia de manabí,*.
- Ávila, J., & Sansores, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería, 2*, 47-54.
- Bassin, J. P., Dias, I. N., Cao, S. M. S., Senra, E., Laranjeira, Y., & Dezotti, M. (2016). Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: Assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. *Process Safety and Environmental Protection, 100*, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.007>
- Belzona. (2010). *Tratamiento de aguas residuales /tipos de tratamiento de aguas residuales.*
- Benítez, A., & Recalde-Torres. (2023). Manejo de aguas residuales domiciliarias urbanas del Municipio de San Estanislao, Departamento de San Pedro año 2019. *Arandu Poty, 2(1)*, 2-5.
- Boavida-Dias, R., Silva, J. R., Santos, A. D., Martins, R. C., Castro, L. M., & Quinta-Ferreira, R. M. (2022). A Comparison of biosolids production and system efficiency between activated sludge, moving bed biofilm reactor, and sequencing batch moving bed biofilm reactor in the dairy wastewater treatment. *Sustainability (Switzerland), 14(5)*. <https://doi.org/10.3390/su14052702>
- Cabrera Molina, E., Hernández Garciadiego, L., Gómez Ruíz, H., & Cañizares Macías, Ma. D. P. (2003). Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. *Revista de La Sociedad Química de México, 47(1)*, 88-92.
- Depez, K. (2021). Nitrógeno amoniacal en aguas residuales domesticas utilizando sedimentador primario con diferentes condiciones hidráulicas, marcara 2019. In *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* (Vol. 5, Issue 4, pp. 4296-4310). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.621
- Di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019a). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 247, pp. 849-866). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>
- Di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019b). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental, 247(June)*, 849-866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>
- DIAZ CUENCA, E., ALVARADO GRANADOS, A. R., Camacho Calzada, K. E., DIAZ CUENCA, E., ALVARADO GRANADOS, A. R. 74044, & Camacho Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera (México) Num.1 Vol.14*.
- Duque Sarango, P. J., Heras-Naranjo, C., Lojano-Criollo, D., & Vilorio, T. (2018). Modelamiento del tratamiento biológico de aguas *Management* residuales; estudio en planta piloto de contactores biológicos rotatorios.//Modeling of biological wastewater treatment; study in pilot plant of rotating biological contactors. *Ciencia Unemi, 11(28)*, 88-96. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss28.2018pp88-96p>
- Escobar, D.; García, E. (2019). *Y destino emerging pollutants : origin and destination.*
- Espinoza, K., Fernández, C., Benalcazar, D., Romero, D., & Lapo, B. (2019). Support materials

- of fixed biofilm based on solid plastic wastes for domestic wastewater treatment. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 42(2). <https://doi.org/doi.org/10.22209/rt.v42n2a03>
- Fernandez, E; Monforte, J. (2019). *Eliminación del nitrógeno amoniacal en aguas residuales sanitarias*.
- Ferrer, J., & Seco Torrecillas, A. (2008). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*.
- García, B; Lopez, E. (2020). *Para el análisis químico de la contaminación por nitritos y nitratos en aguas de consumo procedure for the chemical analysis of nitrite and nitrate contamination in drinking water*. 190-195.
- García Gómez, C., Gortáres Moroyoqui, P., & Drogui, P. (2011). Contaminantes emergentes: efectos y tratamientos de remoción. *Revista Química Viva*, 2, 96-105.
- García, K., & Valera, L. (2019). *Efecto del tiempo de residencia y dosis de Trichoderma sp. en la DQO, Coliformes y E. Coli en aguas del PTAR Jequetepeque*. Universidad César Vallejo.
- González L. (2018). Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Revista Académica UTP: Mente & Materia*, 4, 12-13.
- Guzman, E. (2022). Tratamiento de aguas residuales municipales mediante sistemas de biomasa fija. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/3995/1/TESIS%20FINAL-DCA-2021-ERICK%20R.G.G_Erick%20Rodrigo%20Guzm%C3%A1n.pdf
- Hermansson, A., Jacobsson, S., De Jonge, N., Nielsen, J. L., & Morgan-Sagastume, F. (2022a). Impact of the restraint of biofilm volume and thickness on the performance and microbial composition in anaerobic moving-bed biofilm reactors (AnMBBRs). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107741>
- Hermansson, A., Jacobsson, S., De Jonge, N., Nielsen, J. L., & Morgan-Sagastume, F. (2022b). Impact of the restraint of biofilm volume and thickness on the performance and microbial composition in anaerobic moving-bed biofilm reactors (AnMBBRs). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107741. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107741>
- INEC, ARCA, AME, & BDE. (2022). *Estadística de información ambiental económica en gobiernos autónomos descentralizados municipales*.
- Kehrein, P., Van Loosdrecht, M., Osseweijer, P., Garfí, M., Dewulf, J., & Posada, J. (2020). A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(4), 877-910. <https://doi.org/10.1039/C9EW00905A>
- Leyva-Díaz, J. C., Monteoliva-García, A., Martín-Pascual, J., Munio, M. M., García-Mesa, J. J., & Poyatos, J. M. (2020). Moving bed biofilm reactor as an alternative wastewater treatment process for nutrient removal and recovery in the circular economy model. *Bioresource Technology*, 299(December 2019), 122631. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122631>
- Lin, J., Li, J., Xu, Y., Xie, M., Zhao, S., & Ye, W. (2023). Editorial: Wastewater treatment & resource recovery technologies. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2023.1150044>
- Mahto, K. U., & Das, S. (2022). Bacterial biofilm and extracellular polymeric substances in the moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: A review. *Bioresource technology*, 345(November 2021), 126476. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126476>
- Marín, Alfonso., Gonzalez, V., Lapo, B., Molina, E., & Lemus, M. (2016). Mercury levels in sediments from the coast of El Oro - Ecuador. *Gayana*, 80(2), 147-153. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382016000200147>
- Marina, L., Urrego, N., Sánchez, R. G., & Moreno, A. D. (2014). Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 30(1), 101-112.
- Matinez, Alma. (2020). *Evaluación Del Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales*.
- Medina Herrera, M. del R., Negrete Rodríguez, M. de la L. X., Gámez Vázquez, F. P., Álvarez Bernal, D., & Conde Barajas, E. (2020). La Aplicación De Lodos Residuales Afecta, a Corto Plazo, Biomasa Microbiana Y Su Actividad En Suelos Sódicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 577-591. <https://doi.org/10.20937/rica.53425>
- Orozco Jaramillo, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y diseño* (segunda, Vol. 1).

- Osorio, M., Carrillo-Barahona, W., Negrete-Costales, J., Loor-Lalvay, X., & Riera-Guachichullca, E. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del conocimiento*, 6(3), 228-245. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Osorio Rivera, M. A., Carrillo Barahona, W. E., Negrete Costales, J. H., Loor Lalvay, X. A., & Riera Guachichullca, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del conocimiento: Revista Científico - Profesional, ISSN-e 2550-682X, Vol. 6, N°. 3, 2021, Págs. 228-245, 6(3), 228-245.* <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Pascual, J. (2014). Estudio técnico de biorreactores de membrana con lecho móvil aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas. <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/33998/23062757.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Peña, S., Mayorga, J., & Montoya, R. (2018). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia e Ingeniería*, 39(2), 162-162.
- Raj Deena, S., Kumar, G., Vickram, A. S., Rani Singhanian, R., Dong, C. Di, Rohini, K., Anbarasu, K., Thanigaivel, S., & Ponnusamy, V. K. (2022). Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment. In *Bioresource technology* (Vol. 359). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127421>
- Ramirez-Rodriguez, J. C. (2023). Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión. *Informador técnico*, 87(1), 82-106. <https://doi.org/10.23850/22565035.5304>
- Sagrario, G. (2015). *Eliminación de nutrientes mediante tratamientos biopelícula*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Saidulu, D., Majumder, A., & Gupta, A. K. (2021). A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. *Journal of environmental chemical engineering*, 9(5), 106112. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106112>
- Santos, A. D., Martins, R. C., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2020). Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. *Energy Reports*, 6, 340-344. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.158>
- Spellman, F. (2020). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (4th ed.). CRC Press.
- Vargas, A. K. N., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., Núñez, D. A., Vargas, A. K. N., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D. A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200315>
- Wang, S., Parajuli, S., Sivalingam, V., & Bakke, R. (2019). Biofilm in moving bed biofilm process for wastewater treatment. In *Bacterial biofilms*. www.intechopen.com

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

¡Evolución académica!

@UNEMIEcuador

