



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Evaluación del tiempo de residencia hidráulica en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante el proceso de *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) a nivel laboratorio

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTORES

Yoselin Nelly MALLAUPOMA ESPINOZA

Janet Lucero NAVARRO INGA

ASESOR

Mg. Fernando ANAYA MELÉNDEZ

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Mallaupoma, Y. & Navarro, J. (2024). *Evaluación del tiempo de residencia hidráulica en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante el proceso de Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) a nivel laboratorio*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Yoselin Nelly Mallaupoma Espinoza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76364367
URL de ORCID	
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Janet Lucero Navarro Inga
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74973470
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Fernando Anaya Meléndez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06550807
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3131-3961
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Mercedes Puca Pacheco
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09610017
Miembro del jurado 1	

Nombres y apellidos	Manuel Jesús Luna Hernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06897800
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.1. Remediación de agua, aire y suelo
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Edificio: Laboratorio de Química Analítica País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: El Cercado Latitud: -12.060436 Longitud: -77.083162
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del **Dra. MERCEDES PUCA PACHECO**; **Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ (Miembro)** y el **Mg. FERNANDO ANAYA MELÉNDEZ (Asesor)**; habiendo presentado para tal efecto la **TESIS**, titulada **Evaluación del tiempo de residencia hidráulica en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante el proceso de Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) a nivel laboratorio, SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **MALLAUPOMA ESPINOZA, YOSELIN NELLY** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarla con la **NOTA** de:

DIECISIETE

(LETRAS)

17

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

Dra. MERCEDES PUCA PACHECO

Presidenta

Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ

Miembro

Mg. FERNANDO ANAYA MELÉNDEZ

Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE

Director de la E.P. de Ingeniería Química





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "III Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-II", bajo la Presidencia del **Dra. MERCEDES PUCA PACHECO**; **Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ (Miembro)** y el **Mg. FERNANDO ANAYA MELÉNDEZ (Asesor)**; habiendo presentado para tal efecto la **TESIS**, titulada **Evaluación del tiempo de residencia hidráulica en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante el proceso de Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) a nivel laboratorio, SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **NAVARRO INGA, JANET LUCERO** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarla con la **NOTA** de:

DIECISIETE

(LETRAS)

17

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 21 de diciembre del 2024

Dra. MERCEDES PUCA PACHECO

Presidenta

Mg. MANUEL JESÚS LUNA HERNÁNDEZ

Miembro

Mg. FERNANDO ANAYA MELÉNDEZ

Asesor

Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE

Director de la E.P. de Ingeniería Química





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, ANAYA MELÉNDEZ FERNANDO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000502-2025-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **Evaluación del tiempo de residencia hidráulica en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante el proceso de Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) a nivel laboratorio**, presentado por las bachilleres: Yoselin Nelly Mallaupoma Espinoza y Janet Lucero Navarro Inga para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 15% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 19 de mayo de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Anaya Meléndez Fernando

DNI: 003271

DEDICATORIA

Yoselin Nelly MALLAUPOMA ESPINOZA

Dedicado a mi Dios amado, por darme su paz y misericordia todos los días y porque aunque no lo merezca él me la concede porque es un Dios de amor. ¡Para él sea toda la gloria por siempre y para siempre!.

*“Y estoy convencido de que nada podrá jamás separarnos del amor de Dios. Ni la muerte ni la vida, ni ángeles ni demonios, ni nuestros temores de hoy ni nuestras preocupaciones de mañana. Ni siquiera los poderes del infierno pueden separarnos del amor de Dios. Ningún poder en las alturas ni en las profundidades, de hecho, nada en toda la creación podrá jamás separarnos del amor de Dios, que está revelado en Cristo Jesús nuestro Señor”
(Romanos 8:38-39).*

Janet Lucero NAVARRO INGA

Dedicado a mis queridos padres, Marcelino y Delia, por su paciencia, amor incondicional y apoyo constante. Su confianza en mí y motivación han sido fundamental para alcanzar este logro.

A mis hermanos, Junior y Miguel, por su apoyo y motivación que me impulsaron a seguir adelante en este camino. A todas las personas importantes en mi vida que ya no están presentes, pero que siempre me guían desde el recuerdo.

Gracias a todos por creer en mí, por ser mi fortaleza y fuente de inspiración en cada logro de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Al concluir esta etapa en nuestras vidas, queremos agradecer en primer lugar a nuestro Señor Jesucristo por ser nuestra fortaleza, por su amor infinito y por nunca dejarnos solas en este camino.

Asimismo, a nuestro asesor de tesis el Mg. Fernando Anaya, por su orientación y apoyo durante todo el proceso de investigación.

Expresamos nuestro agradecimiento a los docentes que nos brindaron su valioso apoyo para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a nuestra alma mater la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por la formación recibida lo cual ha sido fundamental para nuestro desarrollo personal y profesional.

Finalmente, agradecer a nuestras familias y personas especiales en nuestra vida por su apoyo y comprensión durante todo el proceso y también por la motivación a seguir adelante. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	12
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.2.1. Formulación del problema.....	5
1.2.1.1. Problema general.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Importancia y alcance de la investigación.....	6
1.5. Limitaciones de la investigación.....	7
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1. Marco teórico.....	8
2.1.1. Aguas residuales domésticas.....	8
2.1.2. Clasificación de las aguas residuales domésticas.....	8
2.1.2.1. Aguas grises.....	8
2.1.2.2. Aguas negras.....	10
2.1.3. Parámetros de las aguas residuales.....	11
2.1.3.1. Parámetros físicos.....	11
2.1.3.2. Parámetros químicos.....	12
2.1.4. Tratamiento de aguas residuales domésticas.....	14
2.1.4.1. Tratamiento preliminar.....	17
2.1.4.2. Tratamiento primario.....	18
2.1.4.3. Tratamiento secundario.....	19
2.1.4.4. Tratamiento terciario.....	20
2.1.5. Tecnología de tratamiento de agua residuales por lodos activados.....	22
2.1.6. Tecnología de tratamiento de agua residuales por biopelículas.....	23
2.1.6.1. Sistemas de biopelícula o reactores de biopelícula.....	26
2.1.6.2. Tipos de reactor de biopelícula.....	27
2.2. Antecedentes del estudio.....	36
2.2.1. Nacionales.....	36
2.2.2. Internacionales.....	38
2.3. Definición de términos.....	41
2.3.1. Sólidos Sedimentables.....	41
2.3.2. Coloides.....	41

2.3.3. Sólidos disueltos.....	41
2.3.4. Biomasa.....	41
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	42
3.1. Hipótesis.....	42
3.1.1. Hipótesis general.....	42
3.2. Descripción de variables.....	42
3.2.1. Variables dependientes e independientes.....	42
3.2.1.1. Variables independientes.....	42
3.2.1.2 Variables dependientes.....	42
3.2.2. Variables del proceso.....	43
3.3. Operacionalización de las variables.....	43
CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
4.1. Área de estudio.....	45
4.2. Diseño de investigación.....	46
4.3. Población y muestra.....	48
4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información.....	48
4.4.1. Procedimientos.....	48
4.4.1.1. Toma y caracterización de muestra de aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria.....	48
4.4.1.2. Acondicionamiento del MBBR.....	50
4.4.1.3. Fijación de microorganismos.....	54
4.4.1.4. Arranque del MBBR.....	59
4.4.1.5. Determinación del porcentaje de remoción.....	61
4.4.2. Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	61
4.4.2.1. Técnicas.....	61
4.5. Análisis estadístico.....	62
CAPÍTULO V. RESULTADOS.....	63
5.1. Presentación y análisis de los resultados.....	63
5.1.1. Caracterización de la muestra de aguas grises sin tratamiento.....	63
5.1.2. Medición del pH, temperatura y OD en el tratamiento MBBR.....	63
5.1.2.1. Medición del pH en función del TRH.....	64
5.1.2.2. Medición de la temperatura en función del TRH.....	64
5.1.2.3. Medición del oxígeno disuelto en función del TRH.....	65
5.1.3. Variación del pH, temperatura y OD en el tratamiento MBBR.....	65
5.1.3.1. Variación del pH en relación con el TRH.....	65
5.1.3.2. Variación de la temperatura en relación con el TRH.....	66
5.1.3.3. Variación del OD en relación con el TRH.....	68
5.1.4. Influencia del tiempo de residencia hidráulica.....	68

5.1.5. Remoción de DQO, DBO5 y Detergentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria.....	69
5.2. Análisis estadístico de las variables.....	71
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN.....	75
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
7.1. Conclusiones.....	77
7.2. Recomendaciones.....	78
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	79
CAPÍTULO IX. ANEXOS.....	88
9.1. Cronograma de actividades.....	88
9.2. Matriz de consistencia.....	89
9.3. Cálculos del porcentaje de remoción de la DQO y la DBO5.....	91
9.3.1. Determinación del porcentaje de remoción DQO en tiempo de residencia hidráulica igual a 6 horas, 26 horas y 46 horas.....	91
9.3.2. Cálculo del porcentaje de remoción de la DBO5 a las 26 horas y 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.....	92
9.3.3. Cálculo del porcentaje de remoción de los detergentes a las 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.....	93
9.4. Evidencia fotográfica de las mediciones de parámetros pH, temperatura y oxígeno disuelto en el tratamiento.....	94
9.5. Toma de muestra al inicio, a las 6, 26 y 46 horas del tratamiento.....	95
9.6. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises sin tratamiento.....	96
9.7. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises a las 6 horas de tratamiento.....	97
9.8. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises sin tratamiento y a las 26 horas de tratamiento.....	98
9.9. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises a las 46 horas de tratamiento.....	99
9.10. Ficha de recolección de datos.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las aguas grises por origen	9
Tabla 2. Porcentaje de aguas grises generadas a partir de uso doméstico	10
Tabla 3. Tipos de carrier de la serie K AnoxKaldnes	30
Tabla 4. Tabla de operacionalización de las variables	43
Tabla 5. Niveles explorados de la variable	47
Tabla 6. Requisitos mínimos para ensayos de muestras ambientales - agua.	49
Tabla 7. Caracterización de aguas grises proveniente de lavandería domiciliaria	50
Tabla 8. Lista de materiales	51
Tabla 9. Especificaciones técnicas de los carriers	59
Tabla 10. Caracterización del agua gris proveniente de lavandería domiciliaria, sin tratamiento.	63
Tabla 11. Valores de pH en función del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento	64
Tabla 12. Valores de temperatura en función del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento	64
Tabla 13. Valores de oxígeno disuelto en función del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento	65
Tabla 14. Influencia del tiempo de residencia hidráulica (TRH) en el proceso de MBBR	69
Tabla 15. Porcentajes de remoción de DQO, DBO5 y detergentes con variaciones de TRH	69
Tabla 16. Pruebas de normalidad del tiempo de residencia hidráulica y la DQO	72
Tabla 17. Pruebas de normalidad del tiempo de residencia hidráulica y la DBO5	72
Tabla 18. Correlación entre tiempo de residencia hidráulica y % de remoción de DQO	74

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Evolución de tratamiento de aguas residuales (TAR), 2019-2023	15
Gráfico 2. Tecnologías de las PTAR en el ámbito de las empresas prestadoras	16
Gráfico 3. Esquema de una PTAR	18
Gráfico 4. PTAR con unidades de tratamiento primario	19
Gráfico 5. PTAR con unidades de tratamiento secundario	20
Gráfico 6. PTAR con unidades de tratamiento terciario	21
Gráfico 7. PTAR con desinfección	22
Gráfico 8. Variación del pH en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)	66
Gráfico 9. Variación de la temperatura en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)	67
Gráfico 10. Variación del oxígeno disuelto en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)	68
Gráfico 11. Porcentaje de remoción de DQO en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria por MBBR	70
Gráfico 12. Porcentaje de remoción de DBO5 en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria por MBBR	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una PTAR	17
Figura 2. Etapas de formación de una biopelícula	25
Figura 3. Zonificación de una biopelícula	26
Figura 4. Componentes de un reactor de biopelícula	27
Figura 5. Los principios de operación del MBBR	28
Figura 6. Carriers con formación de biopelícula	30
Figura 7. Nitrificación y Desnitrificación Simultáneas	33
Figura 8. Eliminación de nitrógeno	34
Figura 9. Esquema de un filtro percolador	35
Figura 10. Punto de muestreo de las aguas grises	45
Figura 11. Mapa de ubicación de toma de muestra	46
Figura 12. Dimensiones del reactor, cm	51
Figura 13. Acondicionamiento del MBBR	52
Figura 14. Imágenes de pruebas hidráulicas	53
Figura 15. Compresora de aire SUN SUN, ACO -002	54
Figura 16. Inoculación de microorganismos en el reactor	55
Figura 17. Formación de biopelícula en los carriers	55
Figura 18. Reactor MBBR en funcionamiento	60
Figura 19. Carriers antes y después del tratamiento	60

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la relación entre el tiempo de residencia hidráulica y el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO_5 y detergentes) presentes en las aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, en un reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) a nivel laboratorio. Primero, la muestra de aguas grises residuales fue recolectada de la lavandería de un domicilio del distrito de San Juan de Lurigancho. A su vez, el reactor de laboratorio consistió de un recipiente rectangular de vidrio con las siguientes dimensiones: largo de 60 cm, ancho de 50 cm y altura de 50 cm, para procesar 50 L de aguas residuales en sistema batch, al cual se le acondicionaron dos compresoras de aire, dos bombas de aire, cuatro difusores de aire y mangueras hidráulicas con la finalidad de oxigenar y mantener en movimiento los soportes (carriers) de las siguientes características: material de polímero modificado, diámetro de 10 mm, superficie específica de $900 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y densidad igual a $130 \text{ kg}/\text{m}^3$. Posteriormente, se realizó la fijación de microorganismos procedentes de lodos activados por un periodo de 60 días con la finalidad de acelerar el desarrollo de biopelícula en los carriers. Luego de la fijación, se realizó la puesta en marcha del proceso con un porcentaje de llenado del 40% de carriers respecto al volumen de agua residual tratada. Finalmente, se realizó la toma de muestra al inicio de la operación del reactor y en tres tiempos de residencia hidráulica (TRH), a las 6, 26 y 46 horas. Los resultados obtenidos a las 6 horas de tiempo de residencia hidráulica dieron una remoción de 24.13% para la DQO, a las 26 horas de tiempo de residencia hidráulica la remoción de DQO alcanzó un 76.20% mientras que la remoción de DBO_5 fue de 82.41%, y a las 46 horas de tiempo de residencia hidráulica se obtuvo una remoción del 93.35% para la DQO, del 94.04% para la DBO_5 y del 98.69% para detergentes. Se concluye que a un mayor tiempo de residencia

hidráulica del tratamiento de las aguas grises en el MBBR contribuye a una mayor remoción de los principales contaminantes.

Palabras clave: Biopelícula, carrier, aeróbico, DQO, DBO₅, Detergentes, MBBR, fijación, TRH.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the relationship between hydraulic residence time and the percentage of removal of the main contaminants (COD, BOD₅, and detergents) present in gray water from household laundry, in a moving bed biofilm reactor (MBBR) at the laboratory level. First, the gray wastewater sample was collected from a household laundry in the San Juan de Lurigancho district. The laboratory reactor consisted of a rectangular glass container with the following dimensions: length of 60 cm, width of 50 cm, and height of 50 cm, designed to process 50 L of wastewater in a batch system. Two air compressors, two air pumps, four air diffusers, and hydraulic hoses were installed to oxygenate and keep the carriers in motion. The carriers had the following characteristics: modified polymer material, diameter of 10 - 25 mm, specific surface area of 900 m²/m³, and density of 130 kg/m³. Subsequently, microorganisms from activated sludge were fixed for a period of 60 days to accelerate the development of biofilm on the carriers. After fixation, the process was initiated with a carrier filling percentage of 40% relative to the volume of treated wastewater. Finally, samples were taken at the beginning of the reactor operation and at three hydraulic residence times (HRT): 6, 26, and 46 hours. The results obtained at 6 hours of hydraulic residence time showed a removal of 24.13% for COD. At 26 hours of hydraulic residence time, the COD removal reached 76.20%, while the BOD₅ removal was 82.41%. At 46 hours of hydraulic residence time, a removal of 93.35% for COD, 94.04% for BOD₅, and 98.69% for detergents was achieved. It is concluded that a longer hydraulic residence time in the treatment of gray water in the MBBR contributes to a greater removal of the main contaminants.

Keywords: Biofilm, carrier, aerobic, COD, DBO₅, detergents, MBBR, attachment, HRT.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En los últimos años, la falta de agua para satisfacer la demanda hídrica ha sido un problema que ha afectado a gran parte del mundo. Alrededor del 52% de la población mundial se ve afectada por la escasez de agua, y se espera que para el año 2050 este porcentaje aumente a 57%. En este contexto, una fuente alternativa de agua son las aguas grises debido al beneficio potencial de su tratamiento y reutilización (Rodrigues et al., 2022).

La generación de aguas grises de lavandería domiciliaria representa una cantidad considerable en relación con el total de aguas residuales domésticas, siendo entre el 15% y el 40% del total. Estas aguas grises contienen una alta concentración de materia orgánica, lo cual si no se tratan de manera adecuada para ser vertidas en cuerpos de agua o reutilizadas, traen como consecuencia un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana (Shaikh & Ahammed, 2024; Khajvand et al., 2022)

Por ello, este estudio evalúa la remoción de materia orgánica específicamente la DQO y DBO_5 presentes en las aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria mediante un reactor de biopelícula de lecho móvil a nivel laboratorio con el objetivo de mitigar la contaminación hídrica, disminuir la carga de los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales, lograr eficiencia en la calidad del efluente tratado.

1.2. Planteamiento del problema

A nivel mundial, en 2022, aproximadamente para 8,019,000,000 de personas generaron 267,500,000,000 m³ de aguas residuales domésticas. A su vez, la generación de aguas residuales domésticas per cápita fue de 33.4 m³/año o 92 L/día. Por otro lado, el 54.7% del total de aguas residuales domésticas generadas reciben tratamiento y el resto son liberadas al medio ambiente (Qadir et al., 2024).

A nivel nacional, en el año 2021 el vertido de aguas residuales domésticas sin ser tratadas ascendió a 255,164,326 m³, donde se registró un descenso del 5,5% en comparación con el año anterior. Además, Lima fue el departamento que generó el mayor porcentaje de estas descargas, con un 30% (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2022).

La liberación de las aguas residuales sin tratamiento en el ambiente no solo causa una grave contaminación de los recursos naturales, sino también conlleva una reducción en la capacidad de tratamiento de los cuerpos de agua (Khanam & Patidar, 2022).

En lo que respecta a las aguas residuales domésticas, estas se dividen en aguas grises, que provienen de lavadoras, duchas, lavamanos, lavaderos y cocinas; y aguas negras, que se originan en los inodoros y urinarios (Khanam & Patidar, 2022). En cuanto a las aguas grises generadas representan entre el 50% y el 80% del total de aguas residuales domésticas producidas (Rodrigues et al., 2022). Por su parte, el volumen de aguas grises en comparación con las aguas negras comprende una cantidad significativa, por tal motivo al no darle un tratamiento por separado se genera un incremento en el volumen de aguas residuales que necesitan tratamiento ocasionando así una dificultad (Anaya et al., 2022).

Específicamente en relación a la lavandería doméstica, ésta representa entre el 15% y el 40% del consumo total de agua en el hogar, lo que la convierte en un factor de consumo considerable. A nivel mundial, aproximadamente 840,000,000 de lavadoras consumen alrededor de 19,000,000,000 m³ de agua/año. Entre el 2010 y 2020, el consumo de agua en lavadoras aumentó un 15%, y se proyecta que experimentará un incremento adicional del 18% entre 2020 y 2030. Asimismo, el número total de lavadoras en el mundo ha crecido, pasando de 840,000,000 de unidades en 2010 a 1,140,000,000 en 2020, y se espera que alcance los 1,440,000,000 para 2030 (Shaikh & Ahammed, 2024).

Estudios de diversos autores han reportado que los factores como los hábitos de uso, las cargas de ropa, la calidad del agua, los niveles de suciedad de la ropa, el tipo y la cantidad de detergente y el tamaño del hogar influyen significativamente tanto en las variaciones de la generación como en la calidad de aguas grises de lavandería. Así también, han destacado un mayor nivel de contaminación en el proceso de lavado de las lavadoras con respecto a los ciclos de enjuague y centrifugado (Shaikh & Ahammed, 2024).

Las aguas grises provenientes de lavandería contienen altas tasas de contaminantes orgánicos y físicos, debido a la presencia de sustancias como jabón, blanqueadores, aceites, pinturas, disolventes y compuestos no biodegradables (Khajvand et al., 2022). En Indonesia, las aguas grises presentan concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) y de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) que oscilan entre 232-780 mg/l y 125-401 mg/l, respectivamente. Además, un estudio realizado por Hafiza et al. (2019) mencionó que el lavado de ropa está relacionado con la alta tasa de demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas grises de dicho país (Wulan et al., 2022).

La presencia excesiva de materia orgánica en las aguas grises, así como su eliminación y reutilización sin tratamiento adecuado, tiene un impacto negativo en el suelo, en las plantas, en los recursos hídricos, en la vida marina y en la salud humana (Khajvand et al., 2022).

Algunas investigaciones estudiaron la reducción de los contaminantes como la DBO_5 y DQO presente en las aguas grises utilizando un tratamiento biológico aerobio dando como resultados buenas tasas de remoción de la materia orgánica. Uno de estos estudios es de Chrispim & Nolasco (2017) donde caracterizaron la calidad y cantidad de diferentes fuentes de aguas grises de un edificio de la Universidad de Sao Paulo, también realizaron monitoreo de un reactor de biopelícula de lecho móvil piloto de aguas sintéticas y analizaron el efluente después del tratamiento. Obteniendo como resultado eficiencias de remoción de DBO_5 y DQO del 59% y 70%, respectivamente. Por su parte, George et al. (2019) evaluaron el porcentaje de remoción de la materia orgánica en las aguas grises tratadas en un reactor de biopelícula de lecho móvil variando la velocidad de flujo, el tiempo de residencia hidráulica y la tasa de llenado de carrier; dando como resultado una máxima eficiencia de remoción de DQO de 87.45%.

De lo mencionado anteriormente, la presente investigación propone evaluar la relación entre el tiempo de residencia hidráulica y el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO_5 y detergentes) presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, en un MBBR a nivel laboratorio.

1.2.1. Formulación del problema

1.2.1.1. Problema general

¿Cómo afecta el tiempo de residencia hidráulica (TRH) en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO₅ y detergentes) presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria en un MBBR a nivel laboratorio?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la relación entre el tiempo de residencia hidráulica y el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO₅ y detergentes) presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, en un MBBR a nivel laboratorio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los principales contaminantes de aguas grises provenientes de la lavandería domiciliaria para determinar los parámetros específicos a evaluar.
- Realizar la fijación de microorganismos en los carriers.
- Evaluar la relación de los tiempos de residencia hidráulica con el porcentaje de remoción de los principales contaminantes a un porcentaje de llenado de carriers del 40% respecto al volumen de aguas grises a tratar.

1.4. Importancia y alcance de la investigación

En las últimas décadas se han desarrollado avances tecnológicos para los sistemas de tratamiento de las aguas residuales. Una de estas tecnologías son los reactores de biopelícula de lecho móvil que han sido ampliamente utilizados por presentar diversas ventajas con respecto a los sistemas convencionales.

Los reactores de biopelícula de lecho móvil requieren de un menor espacio para su funcionamiento, presentan una mayor área superficial para la transferencia de masa, procesan mayores tasas de carga orgánica en tiempos de residencia hidráulica cortos y obtienen una mejor calidad del efluente con respecto a la carga orgánica y a los nutrientes (Leyva-Díaz et al., 2014, citado por Leyva-Díaz et al., 2020). Por tal motivo, esta investigación emplea esta tecnología a nivel laboratorio para la remoción de DQO y DBO₅ en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria debido a la innovación tecnológica y a la eficiencia en el tratamiento.

Por otra parte, esta investigación contribuye a la gestión sostenible de los recursos hídricos al tratar aguas grises, las cuales representan entre el 50% y 80% del volumen diario de las aguas residuales domésticas. En lugar de ser vertidas al sistema de alcantarillado, estas aguas grises son separadas y tratadas, lo que reduce significativamente la carga de los sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales y, a su vez, disminuye los costos energéticos asociados al proceso. Así también preserva la fuente de aguas escasas y reduce los costos de suministro de agua. (Van de Walle et al., 2023; Boano et al., 2020; Shaikh & Ahammed, 2024).

Las aguas grises generadas en el proceso de lavado por las lavadoras domiciliarias contienen contaminantes como la DQO y DBO₅. Esta investigación, al evaluar la eficiencia de remoción de la carga orgánica de aguas grises de lavandería domiciliaria mediante un reactor de

biopelícula de lecho móvil, contribuye a mitigar la contaminación hídrica y fomenta la reutilización de estas aguas, siempre que cumplan con las normativas vigentes.

1.5. Limitaciones de la investigación

Una limitación de esta investigación fue la variabilidad que presentan las aguas grises provenientes de lavadoras domiciliarias, dado que la naturaleza de las aguas grises depende del tipo de ropa lavada, los detergentes utilizados, la calidad de agua de lavado, la frecuencia de lavado, uso de sustancias químicas, etc., dicha heterogeneidad puede influir en los resultados y su interpretación, por ello es posible que no se puedan generalizar los resultados. Otra limitación fue el tiempo de fijación de microorganismos, ya que tomó un tiempo prolongado en comparación a otras investigaciones y en consecuencia hizo que la presente investigación se extendiera más de lo previsto. Además, durante el tratamiento de las aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria se generaron espumas debido a la presencia de detergentes, lo cual dificultó la operación del reactor. Por último, no se visualizó una formación de biopelícula en todos los carriers del reactor, lo cual puede generar que no se obtengan los porcentajes de remoción de DQO y DBO₅ esperados.

Por lo tanto, se sugiere que futuras investigaciones consideren un mayor control sobre estos puntos para obtener resultados más aplicables.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales se generan a partir del uso de agua en diversas actividades, donde se mezclan con sustancias, tanto disueltas como en suspensión, lo que da lugar a la incorporación de contaminantes. Su origen puede estar en actividades domésticas, industriales, agrícolas o pecuarias, siendo estas las principales fuentes de contaminación hídrica (Valencia, 2016).

Las aguas residuales domésticas, también llamadas aguas servidas, contienen una combinación de sustancias orgánicas e inorgánicas, tanto suspendidas como disueltas (Stevens, 2021). Estas aguas residuales provienen de las actividades realizadas en los hogares como lavado de manos, ropa, utensilios de cocina, el uso de baños e inodoros, entre otros. Se clasifican en dos tipos: aguas negras y aguas grises (Koul et al., 2022).

2.1.2. Clasificación de las aguas residuales domésticas

2.1.2.1. Aguas grises

Las aguas grises son las aguas residuales domésticas que provienen de tinajas, duchas, lavaderos, lavamanos y otros similares. Las aguas grises se pueden clasificar en dos subcategorías: aguas grises "claras", que contienen residuos como jabón, champú, pasta de dientes, restos de afeitado, cabello, grasas corporales y pequeñas concentraciones de orina; y

aguas grises "oscuras", que incluyen detergentes, lejía, aceites, pinturas, solventes, restos de comida, grandes cantidades de grasas y otros elementos no biodegradables (Contardo, 2024).

Según su origen, las aguas grises presentan las siguientes características:

Tabla 1

Características de las aguas grises por origen

Origen	Características
Lavaplatos	-Contiene partículas de comidas, aceites y grasas. -Bajas cantidades de coliformes. -Altas cantidades de sólidos suspendidos totales (SST). -Rápido crecimiento y descomposición de microorganismos. -Presencia de detergentes y espumas.
Duchas, tinas y lavamanos	-Pueden presentar coliformes. -Pueden contener orina. -Pueden contener jabón, shampoo, pasta de dientes, etc. -Baja demanda de oxígeno.
Lavadoras	-Contiene coliformes. -Contiene detergentes. -Alta turbiedad. -Alta salinidad y pH. -Alta cantidad de sólidos suspendidos.
Piscinas	-Altas concentraciones de microorganismos. -Alta presencia de cloro, aceites, cosméticos, etc. -Alta presencia de sólidos suspendidos.

Fuente: Imhof & Mühlemann (2005, citado en Contardo, 2024).

Diversos autores han abordado la proporción que representan las aguas grises en relación con el total de aguas residuales domésticas generadas en los hogares. Según Pachkor y Parbat (2017), las aguas grises constituyen entre el 50% y el 80% del total de estas aguas. Por su parte, Manna (2018) señala que las aguas grises comprenden entre el 55% y el 75%.

Cada persona genera aproximadamente entre 135 y 140 litros de aguas grises al día (Lambe & Chougule, 2015; Rana et al., 2014). El porcentaje generado por diversas fuentes se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2

Porcentaje de aguas grises generadas a partir de uso doméstico

Sr. No.	Fuentes	% de aguas grises
1	Baños	55
2	Lavaderos	20
3	Lavado de casa	10
4	Lavado de utensilios	10
5	Cocina	5
Total		100

Fuente: Grey water management – Guidance manual (citado en Rana et al., 2014).

2.1.2.2. Aguas negras

Las aguas negras representan a las aguas que provienen de los inodoros y están contaminadas con sustancias fecales y orina, procedentes de residuos orgánicos tanto humanos como animales (Muñoz, 2008; Contardo, 2024).

2.1.3. Parámetros de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física y química.

2.1.3.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos se refieren principalmente al contenido total de sólidos (suspendidos, sedimentables, coloidales, disueltos). Otras características físicas son el color, el olor, la temperatura, la densidad y la turbiedad.

2.1.3.1.1. Sólidos Totales

Los sólidos totales se definen como la materia que se obtiene al someter al agua a un proceso de evaporación a temperaturas entre 103 y 105°C. Los sólidos totales, pueden clasificarse en filtrables (sólidos coloidales y disueltos) o no filtrables (sólidos en suspensión). Para el proceso de separación suele usarse el filtro de fibra de vidrio (Whatman GF/C) con un tamaño nominal de poro de 1.58 μm . (Metcalf & Eddy, 2003, p. 43).

2.1.3.1.2. Temperatura

Debido a su influencia en las reacciones químicas, las velocidades de reacción, el desarrollo de la vida acuática y los diversos usos que se le otorgan, es un parámetro muy importante. Para lograr el desarrollo de la actividad bacteriana la temperatura óptima debe estar entre los 25°C y los 35°C (Metcalf & Eddy, 2003, p. 55).

2.1.3.2. Parámetros químicos

El estudio de los parámetros químicos de las aguas residuales abarcan tanto a los componentes químicos inorgánicos como a los componentes químicos orgánicos.

2.1.3.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH)

Se emplea para determinar el grado de alcalinidad o acidez del agua residual. Será más ácido cuanta más actividad de iones de hidrógeno exista o en caso contrario cuando haya menos actividad será alcalina, a continuación, se muestra su fórmula matemática (HANNA, s.f.):

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

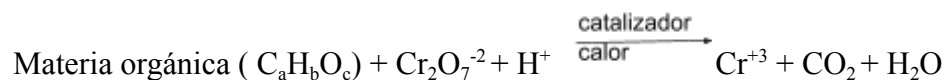
El pH adecuado para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico, situándose entre 6 a 9 (Metcalf & Eddy, 2003, p.57).

2.1.3.2.2. Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La DBO a 5 días (DBO₅) según Metcalf & Eddy (1995), es el parámetro más utilizado para evaluar la contaminación orgánica en aguas residuales. Su determinación se basa en la medición del oxígeno disuelto consumido por los microorganismos durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Cabe destacar que la oxidación bioquímica es un proceso lento, cuya duración en teoría es infinita, sin embargo en un lapso de tiempo de 20 días, la oxidación se logra del 95 a 99 por 100 de la materia carbonosa, asimismo, en los 5 días que dura la medición de la DBO se logra oxidar entre el 60 y el 70 por 100 (Metcalf & Eddy, 1995, p. 80).

2.1.3.2.3. Demanda Química de oxígeno (DQO)

Se emplea para medir el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse, utilizando un agente químico altamente oxidante en medio ácido y a altas temperaturas. Se usa un catalizador (sulfato de plata) para facilitar la oxidación de ciertos tipos de compuestos orgánicos. La DQO de un agua residual suele ser mayor que la DBO debido a que existe una mayor cantidad de compuestos que pueden oxidarse por la vía química que por la vía biológica, a continuación se muestra la reacción química en caso de emplear dicromato como agente oxidante (Metcalf & Eddy, 1995, p. 93).



2.1.3.2.4. Nitrógeno Total

El nitrógeno total es la suma del nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Debido a que el nitrógeno se usa en la síntesis de proteínas, es de vital importancia conocer la presencia de este elemento en las aguas y qué cantidades, ello con la finalidad de evaluar la posibilidad de aplicar un tratamiento biológico a las aguas residuales domésticas e industriales (Metcalf & Eddy, 1995, p.97).

2.1.3.2.5. Fósforo Total

El contenido total en fósforo está compuesto por ortofosfatos o fosfatos, fosfatos condensados y fósforo orgánico. Los altos niveles de fosfatos en los vertidos de agua pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada como distintos tipos de algas y plantas (HACH, s.f.).

2.1.3.2.5. Detergentes

Los detergentes son considerados tensoactivos debido a su capacidad para modificar la tensión superficial del agua. Estos tienen la capacidad de unirse a las sustancias no polares (de aspecto graso) y englobarse en agregados donde facilitan la remoción de la suciedad mediante el arrastre del agua. El azul de metileno es usado para su cuantificación, ya que esta tiene afinidad por los compuestos tensoactivos (Microlab Industrial, s.f.).

2.1.3.2.6. Oxígeno Disuelto

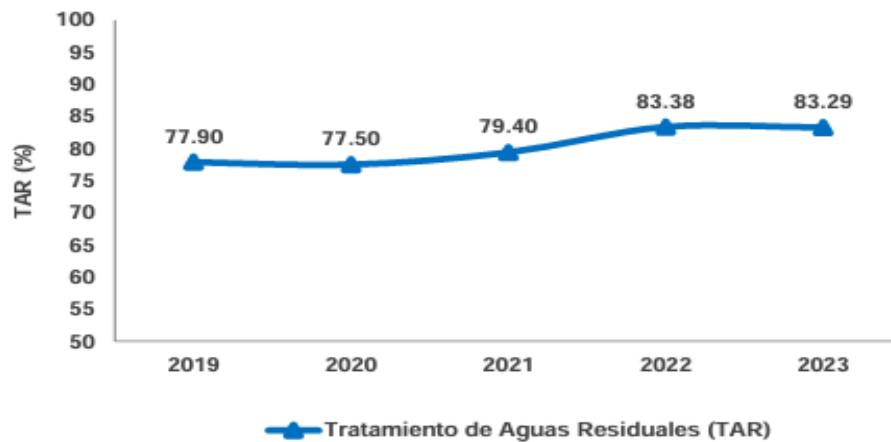
El oxígeno disuelto o “OD” indica cuánto oxígeno está presente en el agua. Los microorganismos utilizan el oxígeno para desarrollarse correctamente mientras degradan la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Un valor adecuado de OD (superior a 2 mg/l), es vital para lograr eliminar los contaminantes del agua. Sin embargo, un nivel de OD muy elevado puede ser perjudicial para la vida acuática (Instituto del Agua, s.f.).

2.1.4. Tratamiento de aguas residuales domésticas

Según la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (2024), el tratamiento de aguas residuales se refiere a las aguas residuales recolectadas que se les da un tratamiento antes de ser vertidas a un cuerpo receptor o reutilizadas. Entre 2019 y 2023, el tratamiento de aguas residuales aumentó de 77.90% a 83.29%, reflejando un incremento del 5.19%. Sin embargo, en 2023 se registró una leve reducción del 0.11% respecto al 2022 (ver Gráfico 1).

Gráfico 1

Evolución de tratamiento de aguas residuales (TAR), 2019-2023

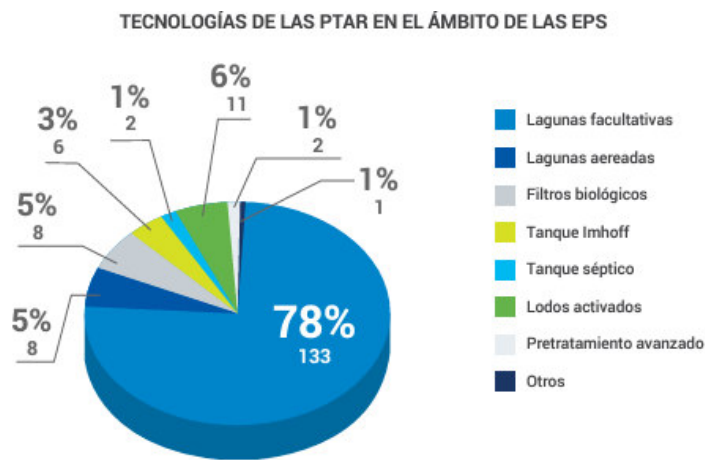


Fuente: Dirección de Fiscalización de la Sunass (citado en Sunass, 2024).

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales emplea diversas tecnologías (ver Gráfico 2). La tecnología más utilizada son las lagunas facultativas, que representan el 78% del total de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) operativas, que ascienden a 171 (Sunass, 2022).

Gráfico 2

Tecnologías de las PTAR en el ámbito de las empresas prestadoras

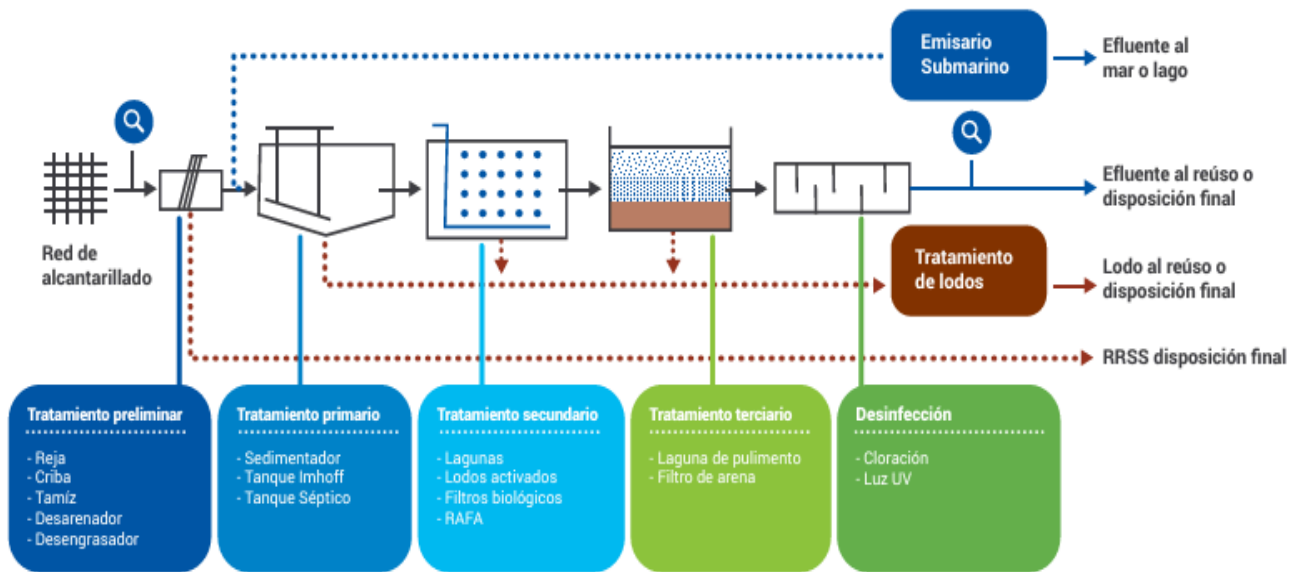


Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

La línea de agua de una PTAR incluye diversas unidades de tratamiento, desde su entrada a la instalación hasta su descarga final en el cuerpo receptor. A continuación, se muestran en la imagen las diferentes operaciones y procesos unitarios existentes en una PTAR (Sunass, 2022).

Figura 1

Esquema de una PTAR



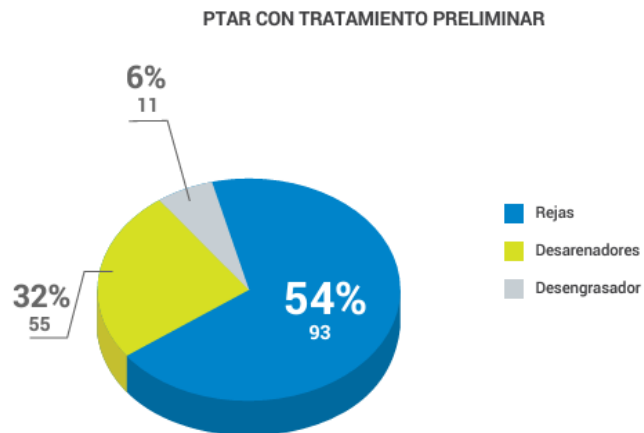
Fuente: Sunass (2022).

2.1.4.1. Tratamiento preliminar

Este tratamiento tiene como objetivo llevar a cabo la depuración de elementos gruesos flotantes, arenas sedimentables, aceites y grasas de las aguas residuales (Sunass, 2022). Las unidades empleadas se muestran en el siguiente gráfico.

Gráfico 3

Esquema de una PTAR



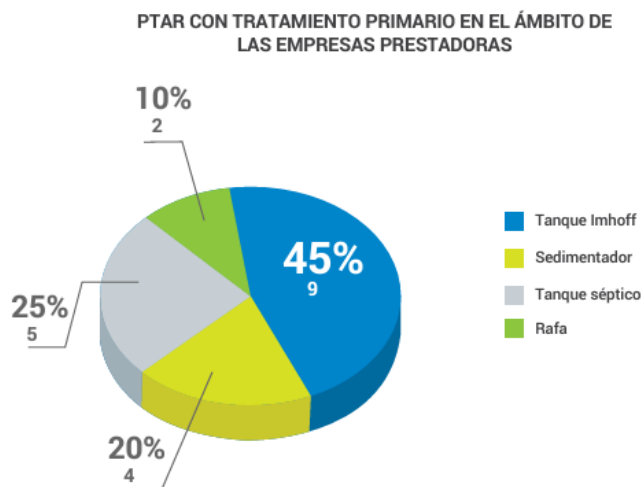
Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

2.1.4.2. Tratamiento primario

Este tratamiento tiene como objetivo remover la materia en suspensión por medio de la gravedad, donde los sólidos removidos deben recibir un tratamiento previo a su disposición final (Sunass, 2022). Las unidades empleadas se muestran en el siguiente gráfico.

Gráfico 4

PTAR con unidades de tratamiento primario



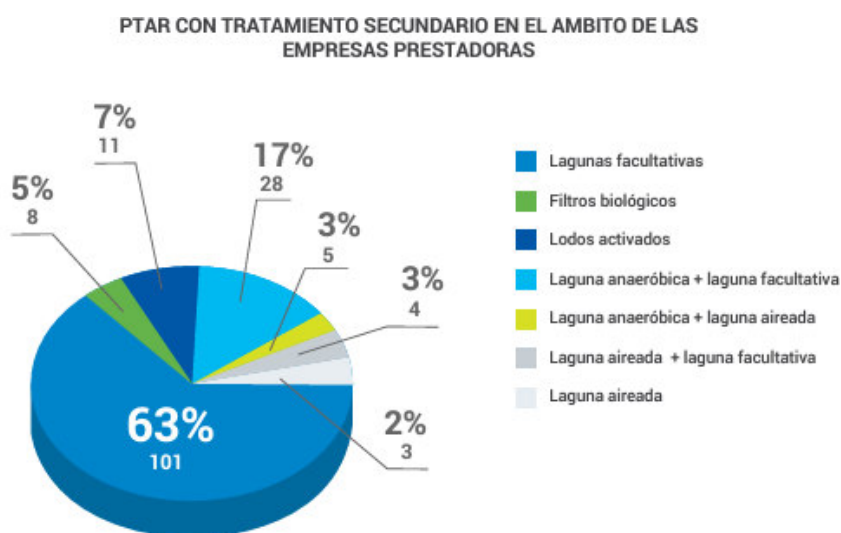
Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

2.1.4.3. Tratamiento secundario

Este tratamiento tiene como objetivo la remoción de la materia biodegradable en estado coloidal y soluble. La tecnología más empleada es la de lagunas facultativas y aireadas, ya sea de forma individual o en combinación. Las demás unidades utilizadas se muestran en el siguiente gráfico (Sunass, 2022).

Gráfico 5

PTAR con unidades de tratamiento secundario



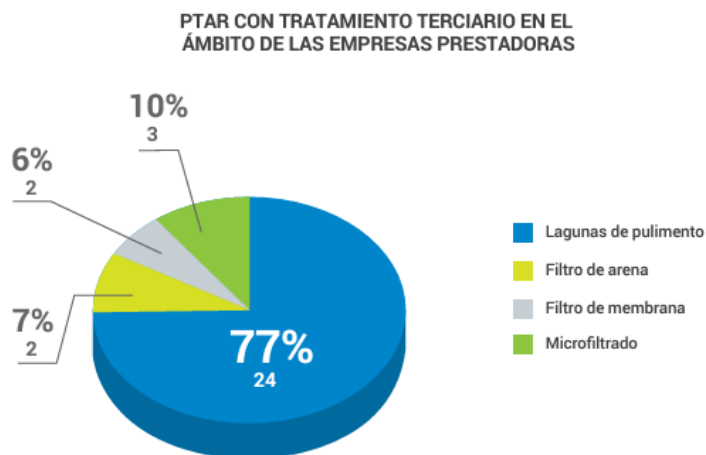
Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

2.1.4.4. Tratamiento terciario

Este tratamiento incluye procesos físico-químicos o biológicos para lograr la remoción de contaminantes potenciales presentes en las aguas residuales, como huevos de helmintos, compuestos orgánicos complejos y compuestos inorgánicos disueltos, entre otros. Las unidades utilizadas se muestran en el siguiente gráfico (Sunass, 2022).

Gráfico 6

PTAR con unidades de tratamiento terciario



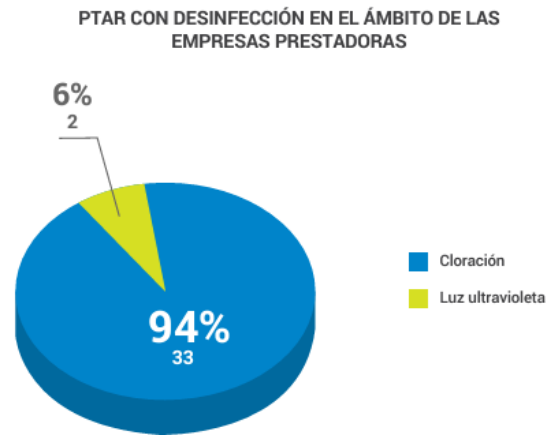
Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

2.1.4.4.1. Desinfección

Las unidades de desinfección, que incluyen procesos químicos con agregado de derivados de cloro o medios físicos como la luz ultravioleta, se utilizan para la remoción de patógenos. Es fundamental que una PTAR cuente con estas unidades de desinfección para cumplir con los parámetros establecidos para la descarga o el reuso del agua (Sunass, 2022).

Gráfico 7

PTAR con desinfección

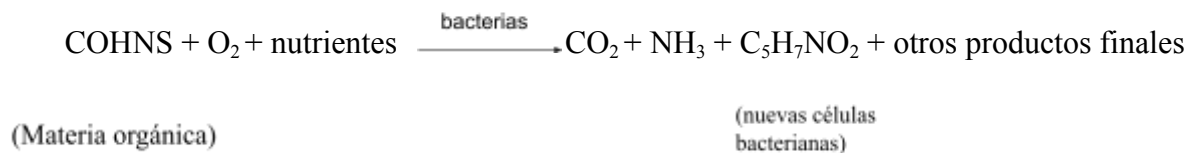


Fuente: Reportes remitidos por las empresas prestadoras (2021, citado en Sunass, 2022).

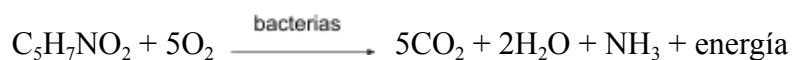
2.1.5. Tecnología de tratamiento de agua residuales por lodos activados

En los procesos de lodos activados, la materia orgánica es introducida en un reactor que contiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. Dentro del reactor, ocurren las siguientes reacciones (Metcalf & Eddy, 1995, p. 436):

Oxidación y síntesis:



Respiración endógena:



El contenido del reactor se conoce con el nombre de “licor mezclado”, el cual fluye después de un determinado tiempo a un sedimentador con la finalidad de separar la mezcla de las células nuevas y viejas. Una parte de las células sedimentadas se recircula al reactor para mantener una concentración de células deseadas en el reactor y la otra parte se purga del sistema (Metcalf & Eddy, 1995, p. 437).

El sistema de lodos activados convencional es habitualmente utilizado por su flexibilidad y capacidad de obtener calidades exigentes de efluentes a costos razonables. Sin embargo, tiene limitaciones en la eficiencia de la separación sólido y líquido, como por ejemplo en la sedimentación secundaria (Van Haendel, A.C. & Van der Lubbe, J.G.M., 2012):

- Se requiere de un gran volumen de tratamiento biológico, debido a la concentración restringida de biomasa en el reactor;
- La sedimentación secundaria ocupa una gran área superficial;
- Se puede comprometer la calidad del efluente, debido a que la eficiencia en el sedimentador secundario puede ser susceptible a las perturbaciones en el tratamiento (picos de caudal y/o el incremento del volumen de lodos o “bulking”).

2.1.6. Tecnología de tratamiento de agua residuales por biopelículas

El uso de sistemas microbianos adheridos para eliminar carbono orgánico y nutrientes de corrientes de residuos tiene más de 100 años de historia en la Tierra. Estos sistemas se basan en la formación de biopelículas, agregación de microorganismos que se adhieren irreversiblemente a superficie de soporte y se cubren con una matriz de sustancia polimérica

extracelular (extracellular polymeric substance, EPS) producida por ellos mismos. La EPS es un grupo de polisacáridos, proteínas y ADN extracelular.

Las biopelículas se forman a través de una serie de etapas, las cuales se detallan a continuación:

Acondicionamiento de la superficie: Las macromoléculas y nutrientes presentes en el agua se adsorben sobre una superficie y se forma una “película acondicionante”, que modifica las propiedades químicas y físicas de la interfaz superficie/fluido, logrando crear un ambiente más favorable para la adhesión bacteriana.

Adhesión: Las células que han logrado mantenerse adheridas a la superficie de forma irreversible producen sustancias poliméricas extracelulares, contribuyendo a la formación y aumento de la biopelícula.

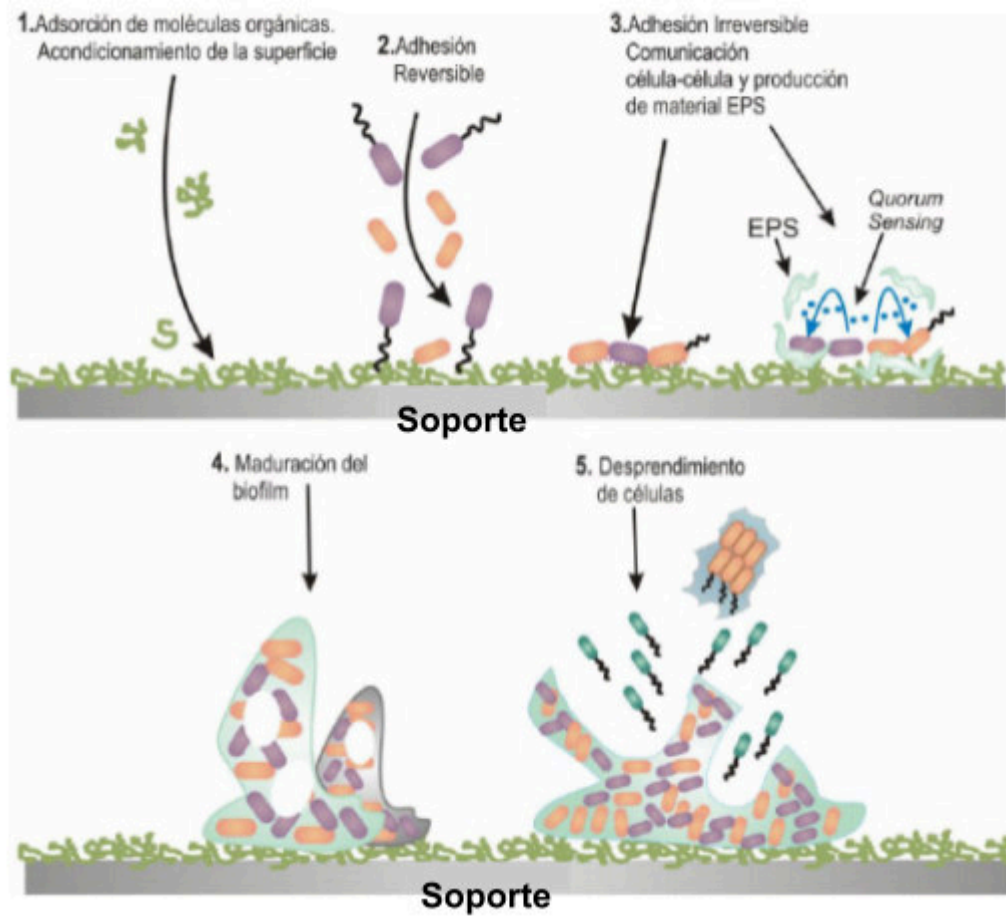
Maduración: El crecimiento de una biopelícula está condicionado por la disponibilidad de nutrientes, la difusión de estos nutrientes dentro de la biopelícula y la eliminación de residuos. Además, el pH interno, la penetración del oxígeno y las fuentes de carbono también influyen en su maduración.

Desprendimiento: La biopelícula sufre un desprendimiento parcial de su masa a causa de fuerzas de corte hidrodinámicas causadas por la velocidad del líquido y la acción mecánica por el choque con otras partículas (González, 2016).

En la Figura 3, se observa como las concentraciones de nutrientes y de oxígeno se reducen a medida que se avanza por la biopelícula. Esto favorece el desarrollo de zonas aerobias y anaerobias, creando distintos microambientes según la disponibilidad de sustrato y oxígeno (González, 2016).

Figura 2

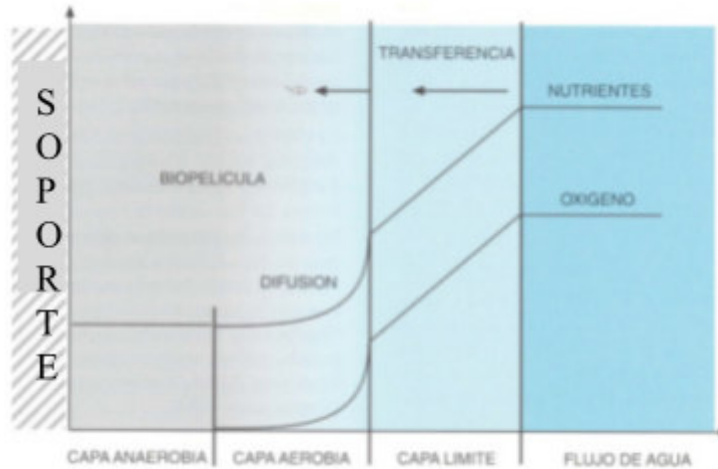
Etapas de formación de una biopelícula



Fuente: Adaptado de Gonzales, 2016.

Figura 3

Zonificación de una biopelícula



Fuente: Adaptado de Gonzales, 2016.

2.1.6.1. Sistemas de biopelícula o reactores de biopelícula

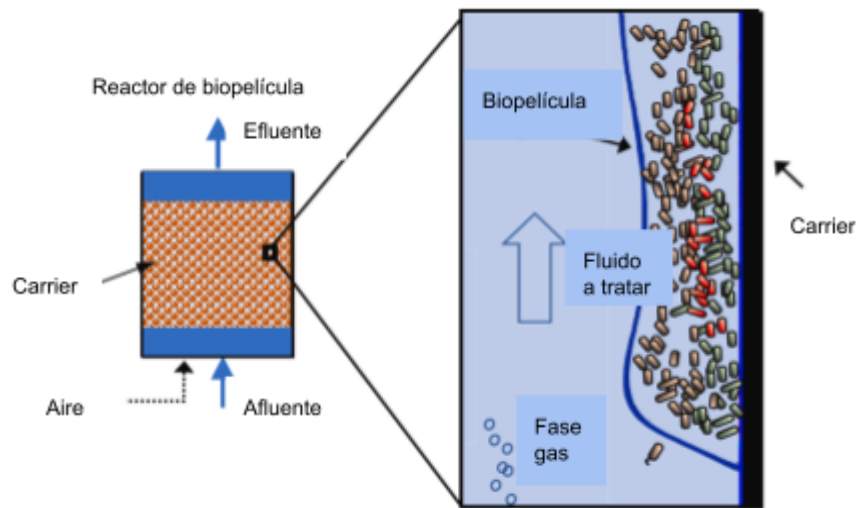
En los reactores de biopelícula, las células microbianas se adhieren a soportes o portadores o “carriers” fijos o móviles. Los reactores de medio fijo se fundamentan en la formación de la biopelícula en un medio estático en el reactor, como por ejemplo el reactor de biopelícula de membrana o los filtros percoladores. Por otro lado, en los sistemas de medios móviles (como el contactor biológico rotatorio, *el reactor de biopelícula de lecho móvil* y el reactor de lecho fluidizado) la biopelícula se forma adherida a carriers que se mueven constante o intermitentemente. Los reactores de biopelícula se componen principalmente por:

- La biopelícula en sí misma.
- El carrier sobre el que crece la biopelícula.
- El fluido (por ejemplo, las aguas grises a tratar).

- Fase gaseosa (opcional), que puede ser aire u oxígeno, etc. (Espinosa - Ortiz et al., 2023)

Figura 4

Componentes de un reactor de biopelícula



Fuente: Adaptado de Espinosa - Ortiz, 2023.

2.1.6.2. Tipos de reactor de biopelícula

2.1.6.2.1. Reactor de biopelícula de lecho móvil

El reactor de biopelícula de lecho móvil (Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR) fue inventado por H. Ødegaard en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología a fines de los años de 1980 y se desarrolló más a fondo a inicios de los años de 1990 (Ødegaard et al., 1994, Ødegaard et al., 1999).

El MBBR se fundamenta en el crecimiento de una biopelícula adherida a carriers fabricados en polietileno o polipropileno, en los cuales se da el crecimiento bacteriano en

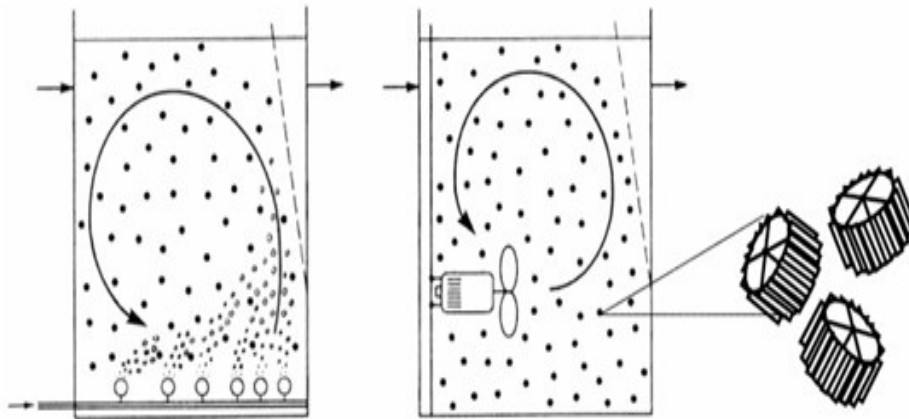
superficies grandes y protegidas. En la Figura 5, se observa el funcionamiento del lecho empacado, el cual puede desplazarse libremente en el reactor debido a dos razones:

- La densidad de los carriers es menor que la del agua.
- El límite máximo de llenado de carriers es el 67% del volumen del reactor.

La inyección de aire de burbuja media o el mezclado mediante agitadores de baja velocidad, son vitales para tener los carriers en suspensión y lograr un espesor adecuado de biopelícula (Odegaard, H., 1999). En los procesos aeróbicos, el movimiento de los carriers se da por la agitación provocada por el suministro de aire, mientras que, en los procesos anóxicos y anaeróbicos, el movimiento de los carriers lo realiza un mezclador.

Figura 5

Los principios de operación del MBBR



Nota. Reactores aerobio (izquierda), reactores anaerobios o anóxicos (mitad) y la forma de carrier de biopelícula original (Kaldnes K1), Odegaard, H. (1999).

➤ Carriers usados en los procesos MBBR

Los carriers son soportes plásticos que ofrecen una superficie amplia para el desarrollo de la biopelícula. El aumento del área de contacto entre la materia orgánica a eliminar y la biopelícula, permite la reducción del volumen del reactor biológico, logrando hacer el proceso más eficiente.

Los primeros carriers usados fueron los de la serie K AnoxKaldnes propiedad de Veolia Water Technologies (Tabla 3), los cuales difieren en medidas y formas, asimismo, ofrecen áreas superficiales efectivas (parte protegida del carrier que no tiene contacto con otros carriers) desde 500 hasta 1200 m².m⁻³.

Un aspecto importante para la selección del carrier es el tipo de proceso (aeróbico o anóxico/anaerobio). Por ejemplo, para las biopelículas heterótrofas aeróbicas de crecimiento rápido, se requieren carriers con aberturas más anchas para evitar la obstrucción y por consiguiente perder área superficial efectiva. Mientras que para las biopelículas autótrofas de crecimiento lento (como en los procesos de nitrificación y anammox) se necesitan carriers de aberturas más pequeñas y de mayor área superficial efectiva como en los BiofilmChips y carrier Z (Di Biase et al., 2019).

Una mayor área superficial efectiva (m².m³) permite:

- Controlar el grosor de la biopelícula y por tanto, permite una mejor tasa de transferencia de nutrientes y oxígeno.
- Evitar el taponamiento de carriers.

El llenado del volumen del reactor con los carriers puede decidirse en base a la caracterización del efluente que se quiere obtener, lo cual permite una gran flexibilidad en el

diseño. Para lograr un movimiento libre de los carriers en suspensión se recomienda un llenado máximo del 70% aproximadamente (Odegaard, 2006).

Tabla 3

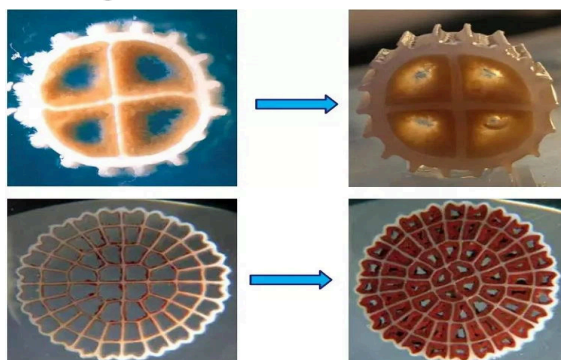
Tipos de carrier de la serie K AnoxKaldnes

Veolia AnoxKaldnes	Área superficial	Diámetro nominal	Altura nominal	Forma
K1	500	7.1	7.2	
K2	350	15	15	
K3	500	25	10	
K5	800	25	3.5	
C2	220	36	30	-
F3	200	46	37	
BiofilmChip M	1,200	48	2.2	
BiofilmChip P	900	45	3	
Z-200	-	30	-	
Z-400	-	30	-	

Fuente: Adaptado de Di Biase et al., 2019

Figura 6

Carriers con formación de biopelícula



Fuente: BioCell, s.f

➤ **Tiempo de residencia hidráulica (TRH)**

Se refiere al tiempo medio durante el cual una molécula de líquido permanece en el reactor, y puede definirse como el volumen del reactor dividido por el caudal medio de entrada (George et al., 2019).

➤ **Relación DQO:N:P**

Los microorganismos encargados de la eliminación de los contaminantes presentes en las aguas residuales necesitan nitrógeno y fósforo para su crecimiento y reproducción, por ejemplo los microorganismos necesitan nitrógeno para formar proteínas, componentes de la pared celular y ácidos nucleicos. En el tratamiento de aguas residuales se establece que para garantizar la presencia de los nutrientes necesarios para el crecimiento de la biomasa la relación DQO:N:P para los sistemas aeróbicos debe ser 100:5:1 (Bashaar, A., 2004).

➤ **Ventajas de la tecnología de biopelícula en lecho móvil**

- Reducción del tamaño del reactor biológico gracias al uso de un carrier que ofrece una alta superficie específica para el crecimiento de la biomasa. Además, la menor concentración de sólidos en suspensión en el reactor permite la reducción del volumen del sistema de separación de sólidos.

- Proporciona una gran flexibilidad, ya que se puede modificar la superficie y por consiguiente la eficiencia del proceso en función del porcentaje del carrier empleado en el reactor, lo cual es recomendable un máximo del 70%.

- La eliminación de la recirculación de lodos en el reactor biológico permite que la biomasa no dependa de la separación final del fango. Esto, a su vez, evita problemas comunes

relacionados con la sedimentación del lodo como el bulking filamentoso (acumulación de microorganismos filamentosos que interfieren con la sedimentación del fango).

- El sistema es de fácil operación y control, ya que se evitan los problemas de obstrucción y periodos de limpieza típicos de otros procesos de biopelícula. Se genera una reducción de los costes de personal para mantenimiento de las instalaciones, ya que no se necesita un monitoreo de la purga de lodos, dado que este tratamiento preserva la biomasa en el reactor hasta que se libera del soporte.

- Al no requerir la recirculación permite el desarrollo de una biomasa específica para cada tipo de reactor (aerobio, anóxico o anaerobio) y en consecuencia se genera una biopelícula con una elevada actividad.

- El proceso es menos sensible a variaciones de carga, ya que la mayor parte de la biomasa crece en la parte interior del soporte plástico (Larrea et al., 2004).

➤ **Desventajas de la tecnología de biopelícula en lecho móvil**

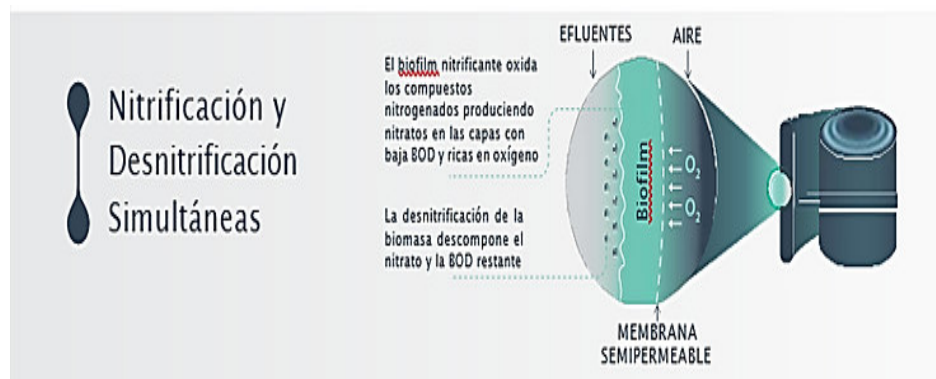
- El costo de energía es mayor a comparación de la tecnología de lodos activados, ya que se necesita mover los carriers mediante la aireación.
- Ante un mantenimiento del reactor biológico es necesario la reubicación de los carriers.
- La nitrificación requiere elevado suministro de oxígeno con altas cargas de amoníaco (Safwat, M., 2019).

2.1.6.2.2. Reactor de biopelícula de membrana aireada (Membrane Aerated Biofilm Reactor, MABR).

El MABR ofrece una solución innovadora en el tratamiento de efluentes, ya que permite que sucedan simultáneamente varios procesos en el mismo tanque, logrando un ahorro de energía y espacio. Utiliza una membrana enrollada en espiral que crea un ambiente adecuado para el desarrollo de una biopelícula con oxígeno en un entorno anóxico, lo que permite la nitrificación y desnitrificación al mismo tiempo. La membrana se sumerge mientras el aire se suministra de forma constante y a baja presión al biofilm que se genera en la membrana, dando lugar a la nitrificación. Sin embargo, la desnitrificación ocurre en el líquido anóxico que rodea a la membrana (Fluence, s.f.).

Figura 7

Nitrificación y Desnitrificación Simultáneas



Fuente: RWC TECHNOLOGIES & CONSULTING, 2022

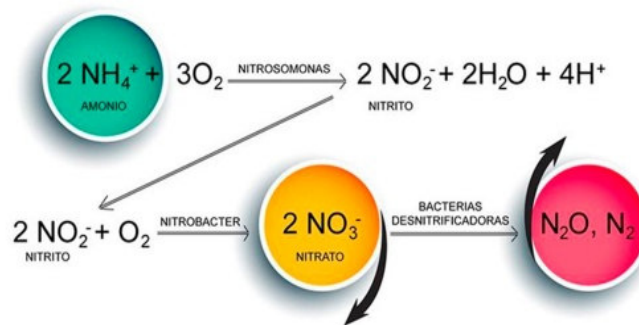
La eliminación de nitrógeno se da en dos pasos, los cuales se detalla a continuación:

- En la nitrificación se da la oxidación de amoníaco (NH_3) y los iones de amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-), los cuales son oxidados a nitrato (NO_3^-), mediante las bacterias conocidas como las nitrificantes (Nitrosomonas y las Nitrobacter).

- En la desnitrificación el nitrato (NO_3^-) se reduce a óxido nitroso (N_2O) y posteriormente a nitrógeno gaseoso (N_2), el nitrato (NO_3^-) es utilizado por bacterias heterotróficas como fuente de oxígeno en la degradación de sustancias orgánicas.

Figura 8

Eliminación de nitrógeno



Fuente: Agua Sigma, s.f.

2.1.6.2.3. Filtro Percolador

El funcionamiento del filtro percolador se lleva a cabo por el contacto de las aguas a tratar con los microorganismos adheridos en forma de biopelícula a un medio empacado, el cual debe tener una alta relación área/volumen. No es necesario inyección de aire, ya que el aire se mueve por diferencial de temperaturas entre el entorno interno y externo del reactor. (Noyola et. al, 2013).

El filtro percolador como parte de los sistemas de biopelícula, donde la biomasa se desarrolla adherida a un medio de soporte como una capa fina o como un gránulo de lodo independiente, puede ser una alternativa para lograr un incremento de la concentración de

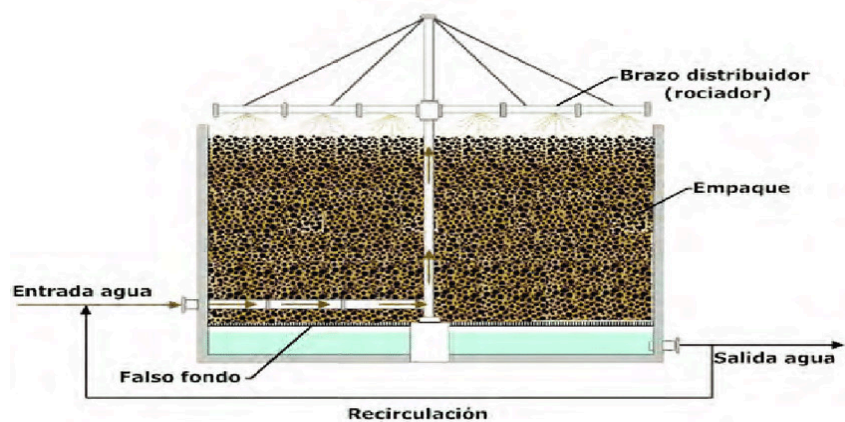
biomasa en el sistema. Sumado a lo anterior mencionado, existen otras ventajas (Van Haendel, A.C. & Van der Lubbe, J.G.M., 2012):

- La menor concentración de biomasa genera que la elección del método de separación de sólidos suspendidos; como por ejemplo la sedimentación, filtración o flotación sea más flexible.
- El caudal puede ser menor, ya que no es necesaria la recirculación de lodos;
- Una mayor concentración de organismos importantes en cualquier punto del tren del proceso, debido a que el ambiente protegido de la biopelícula genera el desarrollo de una biomasa adherida más especializada y activa y porque no hay retorno de biomasa.

El filtro percolador puede ser una solución barata como sistema de biopelícula, sin embargo, tiene limitaciones: baja capacidad de tratamiento, tendencia a la obstrucción del lecho filtrante y problemas de olores (Van Haendel, A.C. & Van der Lubbe, J.G.M., 2012).

Figura 9

Esquema de un filtro percolador



Fuente: Noyola et al., 2013

2.2. Antecedentes del estudio

2.2.1. Nacionales

En la tesis de Cárdenas y Minchola (2024) evaluaron un reactor biológico aeróbico que reusaron soporte de polipropileno, para medir la eficiencia de remoción de los contaminantes en las aguas domésticas de la Universidad Nacional de Trujillo. El reactor estaba compuesto de un tanque de ingreso de 60L, una bomba para la aireación con dos difusores, soporte y un tanque de almacenamiento del efluente de 20L. El estudio incluyó cuatro etapas experimentales, donde se modificaron el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el oxígeno disuelto (OD). Los caudales operativos fueron de 0.00028 L/seg para un TRH de 6 horas y 0.00015 L/seg para un TRH de 11 horas. La caracterización inicial del afluente indicó un pH de 7.29, una temperatura de 25.6 °C, una turbidez de 54 NTU y una DBO₅ promedio de 119 mg/L. En las cuatro etapas, se evaluaron los porcentajes de remoción de materia orgánica, resultando un 86.56% en la etapa I, 94.20% en la etapa II, 90.86% en la etapa III y un 84.16% en la etapa IV. La caracterización del efluente final indicó un pH de 7.19, la misma temperatura inicial, 5 NTU y una DBO₅ promedio reducida a 13 mg/L. Se concluyó que a un tiempo de retención hidráulica más alto y a menor oxígeno disuelto, mayor será el porcentaje de remoción de la materia orgánica.

Huamán et al. (2024), en su artículo, reusaron biosoportes de polietileno tereftalato (PET) para evaluar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales en MBBR. El reactor trabajó en dos porcentajes de llenado de bioportadores (50% y 30%) y dos tiempos de residencia hidráulica (TRH) de 6 y 8 horas. La biopelícula formada después de tres semanas era esponjosa, inconsistente y fina. Se analizó la calidad del efluente obteniendo como resultado una remoción de 81.80% para DBO₅, 78.44% para DQO, 85.96% para SST y 94.13% para

turbidez. Se concluyó que el porcentaje de llenado influyó significativamente en la remoción de DBO_5 y SST, sin embargo el TRH influyó en la remoción de DQO; por lo cual los bioportadores de PET son eficientes. El efluente tratado puede ser descargado en cuerpos hídricos naturales y/o reutilizado en el riego de áreas verdes, según los estándares normativos.

En la tesis de Mayta et al. (2023), desarrollaron un diseño experimental utilizando la tecnología MBBR con el objetivo de disminuir la contaminación de las aguas residuales provenientes del Camal de Cotahuasi. En primer lugar, caracterizaron diversos parámetros del agua residual, como la DBO_5 , DQO, aceites y grasas, SST y coliformes termotolerantes. Posteriormente, se diseñó, construyó y operó un reactor compuesto por Cámara 1 y Cámara 2, cada uno con un volumen de 20 litros. La Cámara 1 fue tratada durante 54 días con un 50% de carriers, obteniendo una remoción del 97.26% para DBO_5 , 83.24% para DQO, 92.03% para aceites y grasas, 89.54% para SST y 99.99% para coliformes termotolerantes. Por su parte, la Cámara 2 fue tratada con un 30% de carriers y durante de 33 días, logrando una remoción del 97.70% para DBO_5 , 85.97% para DQO, 98.34% para aceites y grasas, 93.48% para SST y 99.99% para coliformes termotolerantes. En ambas cámaras, tanto el pH como la temperatura se mantuvieron estables, lo que favoreció el crecimiento adecuado de los microorganismos. Se concluyó que la tecnología MBBR es un tratamiento eficaz para tratar las aguas residuales del camal Municipal de Cotahuasi.

En la tesis de Huaynacho y Larico (2021) evaluaron el rendimiento de la remoción de DBO_5 y DQO del agua residual municipal de la localidad de Mollendo, diseñando un sistema de biopelícula. El volumen reactor biológico fue de 52.5 L con carrier del tipo ABC5 y al 70% de llenado. Se llevó a cabo la operación con diferentes tiempos de residencia hidráulica así

como la concentración de coagulante. Los resultados indicaron que a un tiempo de residencia de 7 horas y una concentración de coagulante cloruro férrico de 55 mg/l, se obtuvo el mayor rendimiento de remoción de DBO_5 (95.7%) y DQO (91%); por tanto, determinaron que la región óptima para la remoción de DBO_5 y DQO, se encuentra entre 6.5 a 7.5 horas para el tiempo de residencia hidráulica; y de 53.1 mg/l a 64 mg/l para la concentración del coagulante. Se concluyó que el porcentaje de remoción aumenta con el tiempo de residencia hidráulica.

2.2.2. Internacionales

Ongena et al. (2023) hicieron un estudio comparativo de la eficiencia de dos sistemas para el tratamiento de aguas grises semisintéticas, tales como Biorreactores de Membrana (MBR) con membranas poliméricas (Polietileno clorado, C - PE) y cerámicas (Carburo de Silicio, SiC) y reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR) de una etapa (66 días) y dos etapas (124 días). El afluente contaba con una DQO total a 379 ± 92 mg/L, Sólidos suspendidos Totales (SST) igual a 0.67 g/L, el nitrógeno se encontraba principalmente como nitrógeno orgánico y amonio y el fosfato no se detectó de forma constante. Los reactores fueron inoculados con lodo activado procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales en 1g/L de sólidos suspendidos de licor mezclado. Tanto MBR y MBBR fueron aireados con bombas de acuario con un flujo de aireación de 0.5 L O_2 /min con un oxígeno disuelto (OD) de 4 mg/L y 1.4 L O_2 /min, este último con mayor tiempo debido a la suspensión de los carrier's con OD de 8 mg/L. En los sistemas MBR se obtuvo una eliminación media de DQO del 94% y 95% para las membranas poliméricas de C- PE y para las cerámicas de SiC, respectivamente; cabe mencionar que con el sistema MBR, la DQO en el efluente fue inferior a 50 mg/L. Por otro lado, para el sistema MBBR se observó una eliminación cercana al 78% después de las 4 semanas, sin embargo, la incorporación de una segunda etapa al día 66 aumentó la eficiencia de

DQO al 86%. Para ambos sistemas no se logró la suficiente remoción de nitrógeno para cumplir estándares internacionales de reuso no restricto de aguas residuales, lo cual pudo deberse a que ambos sistemas fueron aireados continuamente y por lo tanto no se logró una desnitrificación notable.

Nhut et al. (2020), determinaron la eficiencia del tratamiento de aguas residuales domésticas de Vietnam, mediante un reactor de biopelícula de lecho móvil con esponjas (S - MBBR) a escala de laboratorio. Para lo cual utilizaron carriers esponjas de poliuretano con una área de superficie específica de 260 m²/m³ llenado al 20% del volumen del reactor, asimismo, trabajaron cuatro tasas de carga orgánica diferente: OLR1 = 0.4 kg DBO/m³.día; OLR2 = 0.6 kg DBO/m³.día; OLR3 = 0.8 kg DBO/m³.día; OLR4 = 1.0 kg DBO/m³.día. El experimento fue llevado a cabo durante 80 días, resultando que la mayores eficiencias del tratamiento fueron de 85.0 ± 2%, 85.7 ± 5.3%, 68.9 ± 1.7%, and 40.3 ± 0.2% para DQO, SS, TN y TP respectivamente a una tasa de carga orgánica igual 0.4 kg DBO/m³.día con un tiempo de retención de 9h a un caudal igual a 3L/h.

George et al. (2019), evaluaron el porcentaje de remoción de la materia orgánica de aguas grises tratadas en un reactor de biopelícula de lecho móvil. Los factores de variación fueron la velocidad de flujo de 55 L/d, 60 L/d y 70 L/d; los tiempos de retención hidráulica de 39 horas, 36 horas y 31 horas; y la tasa de llenado de 40%, 30% y 25% resultando un porcentaje de remoción respecto a la DQO de 79.6%, 87.45% y 75%, respectivamente. Se concluyó que se obtuvo la máxima eficiencia de remoción de DQO de 87.45% con factores óptimos de caudal de 60 l/d, tiempo de retención hidráulica de 36 horas y llenado de 30%.

Saidi et al. (2017), en su artículo, estudiaron la degradación de materia orgánica en un sistema de reciclaje de aguas grises utilizando un reactor de biopelícula de lecho móvil de varias etapas. Los resultados mostraron que la reducción de la materia orgánica se logró en su mayor parte en los tres primeros reactores, mientras que la tasa de reducción más alta se observó en el tercer reactor en términos de DQO, COD y DBO. El sistema de tratamiento de aguas grises en múltiples etapas demostró un buen desempeño en la remoción de sustrato orgánico, con reducciones de DQO, DBO y COD del 94.5%, 99.4% y 91% respectivamente.

Chrispim, M.C., & Nolasco, M. A. (2017), estudiaron un sistema de tratamiento de aguas grises en el campus universitario en Brasil, el sistema estaba conformado por un MBBR y un tanque de almacenamiento. Se estudiaron tres fuentes de aguas grises, en donde el agua procedente de las duchas tenían la concentración más alta de E.coli (5.06×10^4) mientras que el agua de lavaderos tenía la concentración más alta de coliformes (7.06×10^4), asimismo, en el agua procedente de las lavadoras se detectó una turbidez de 33.5 NTU, SST de 32.7 mg/L, TS de 901.3 mg/L, DQO de 274.1 mg/L, DBO de 77 mg/L, Fósforo Total de 2.3 mg/L, Nitrógeno Total de 4.3 mg/L, TOC de 91.6 mg/L, Sulfato de 111.5 mg/L, Coliformes de 50 CFU. 100 m/L y E. coli de 0 CFU.100 m/L. Las eficiencias de remoción de DBO y DQO fueron 59% y 70% respectivamente. La remoción de fósforo durante el periodo experimental fue bajo (12%). Sin embargo, la calidad del agua producida es viable para ser aplicada en usos exteriores de paisajismo y riego de jardines en hogares, edificios comerciales e institucionales, asimismo, los resultados fueron satisfactorios acorde a los estándares brasileños.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Sólidos Sedimentables

Son aquellos que se sedimentan en la parte inferior de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) durante un tiempo de 60 minutos, se expresa en ml/l. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 59).

2.3.2. Coloides

La fracción coloidal está formada por partículas de materia con tamaños que oscilan entre 0.001 y 1 μm (Metcalf & Eddy, 2003, p. 43).

2.3.3. Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos están compuestas por sales inorgánicas (calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, etc.) y cantidades mínimas de materia orgánica que se disuelven en el agua (HACH, s.f.).

2.3.4. Biomasa

La biomasa se produce tras la degradación de la materia orgánica, que en base a que la materia orgánica carbonosa se simplifica como glucosa y se le da la fórmula $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ se obtiene la biomasa con la fórmula $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ (Bashaar, A., 2004).

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

El porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO₅ y detergentes) presentes en las aguas grises proveniente de lavandería domiciliaria aumenta de manera proporcional al incremento en el tiempo de residencia hidráulica aplicado en un MBBR a nivel de laboratorio.

3.2. Descripción de variables

3.2.1. Variables dependientes e independientes

Para determinar el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO₅ y detergentes) en un MBBR, se consideran las siguientes variables:

3.2.1.1. Variables independientes

La variable independiente es el tiempo de residencia hidráulica, ya que su aplicación no depende de ningún otro factor.

3.2.1.2 Variables dependientes

A continuación, se mencionan las variables dependientes:

- La variable dependiente es el valor de la DQO, ya que depende del tiempo de residencia hidráulica.
- La variable dependiente es el valor de la DBO₅, ya que depende del tiempo de residencia hidráulica.

- La variable dependiente es el valor de detergentes, ya que está influenciada por el tiempo de residencia hidráulica.

3.2.2. Variables del proceso

Se toman en cuenta las variables que se controlan durante el funcionamiento del reactor, las cuales se mencionan a continuación.

- Concentración de oxígeno disuelto (OD) en el reactor.
- Valor de pH en el reactor.
- Temperatura (°C) en el reactor.

3.3. Operacionalización de las variables

Tabla 4

Tabla de operacionalización de las variables

Tipo de variable	Variable	Definición	Símbolo	Unidad de medida	Instrumento
Variable Independiente	Tiempo de residencia hidráulica	Tiempo que el agua permanece en el reactor.	TRH	Horas (hr)	Cronómetro
Variable Dependiente	DQO	Valor de la demanda química de oxígeno.	DQO	mg/L	Análisis en laboratorio externo (ALAB) - Método APHA 5220
	DBO ₅	Valor de la demanda	DBO ₅	mg/L	Análisis en laboratorio

Variable del proceso		bioquímica de oxígeno.			externo (ALAB) - Método APHA 5210
	Detergentes	Valor de detergentes	SAAM	mg/L	Análisis en laboratorio externo (ALAB) - Método APHA 5540
	Oxígeno disuelto	Se emplea para medir el oxígeno disuelto en el reactor.	OD	mg/l	Multiparámetro portátil (Marca WTW, Modelo Multi 3620 IDS)
	Potencial de Hidrógeno	Se emplea para determinar el grado de alcalinidad o acidez del agua gris.	pH	-	pHmetro portátil (Marca HANNA, Modelo HI98103)
	Temperatura	Es una magnitud que se define como la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa.	T	°C	Multiparámetro portátil (Marca WTW, Modelo Multi 3620 IDS)

CAPÍTULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

La toma de muestra se realizó a la salida del tubo de desagüe de una lavadora, el cual transporta las aguas grises hacia el sistema de desagüe. A continuación, se presentan las coordenadas geográficas del lugar de recolección de la muestra:

- Coordenada Sur: 11°57'46.0"S
- Coordenada Norte: 77°00'03.0"N

Figura 10

Punto de muestreo de las aguas grises



Figura 11

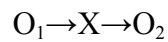
Mapa de ubicación de toma de muestra



4.2. Diseño de investigación

Según Hernández et al. (2007) un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables dependientes son afectadas por una o más variables independientes y el motivo de por qué lo hacen. El enfoque de la investigación actual es tipo experimental, pre y post prueba, debido a que se va manipular de manera intencional la variable independiente (tiempo de residencia hidráulica) y analizar su impacto en las variables dependientes (valores de DQO,

DBO₅ y detergentes) antes y después del tratamiento en el reactor de biopelícula de lecho móvil. A continuación, se muestra su esquema:



Donde:

O₁: Medición inicial de DQO, DBO₅ y detergentes

X :Tiempo de residencia hidráulica (6 horas, 26 horas y 46 horas)

O₂: Medición final de DQO, DBO₅ y detergentes

El diseño experimental se realizará considerando la siguiente variable independiente y sus niveles correspondientes, que se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 5

Niveles explorados de la variable

VARIABLE O FACTOR	SÍMBOLO	UNIDAD	NIVELES A EXPLORAR	
			Min.	Máx.
Tiempo de residencia hidráulica	TRH	H (Horas)	6	46

4.3. Población y muestra

Población

Se refiere a todas las aguas grises provenientes de lavanderías domiciliarias ubicadas en el distrito de San Juan de Lurigancho, provincia de Lima, departamento de Lima; considerando el uso de agua potable para el lavado.

Muestra

En este trabajo se utilizarán como muestra 50 L de las aguas grises provenientes de una lavandería domiciliaria ubicada en el distrito de San Juan de Lurigancho, provincia de Lima, departamento de Lima; considerando el uso de agua potable para el lavado.

4.4. Procedimientos, técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.1. Procedimientos

El procedimiento experimental llevado en la presente investigación se detalla a continuación:

4.4.1.1. Toma y caracterización de muestra de aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria.

La toma de muestra se realizó a la salida del tubo de desagüe de una lavadora de un domicilio ubicado en el distrito de San Juan de Lurigancho, provincia de Lima, Departamento de Lima. El muestreo se ejecutó de acuerdo a los requisitos mínimos (Tabla 6) para ensayos de muestras ambientales - agua residuales proporcionados por un laboratorio externo (Analytical Laboratory E.I.R.L.). La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de los parámetros (DQO, DBO₅, Nitrógeno Total, Fósforo Total, detergentes, pH y Temperatura) en la caracterización de

la muestra, cabe mencionar que se realizó dos caracterizaciones de los parámetros de DQO y DBO₅ con la finalidad de obtener valores más representativos.

Tabla 6

Requisitos mínimos para ensayos de muestras ambientales - agua.

PARÁMETROS	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO PARA ANÁLISIS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Plástico o Vidrio	Llenar recipiente y sellar sin burbujas. Refrigerar $\leq 6^{\circ}\text{C}$	48 horas
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Plástico o Vidrio	Adicionar 10 gotas de H_2SO_4 1:1, $\text{pH} < 2$, Refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	28 días
Fósforo Total	Plástico, Vidrio Ámbar	Adicionar 10 gotas de H_2SO_4 1:1, $\text{pH} < 2$, Refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	28 días
Nitrógeno Total	Plástico o Vidrio	Refrigerar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$	48 horas
pH	Plástico o Vidrio	Analizar preferentemente in situ	Inmediatamente
Temperatura (T)	Plástico o Vidrio	Analizar preferentemente in situ	Inmediatamente

Nota. Adaptado del laboratorio Analytical Laboratory E.I.R.L., 2024.

Tabla 7*Caracterización de aguas grises proveniente de lavandería domiciliaria*

Parámetros	Unidad	Valor		
		1 ^{er} muestreo	2 ^{do} muestreo	Promedio
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	467.1	392.3	429.7
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	784.1	827.6	805.8
Nitrógeno Total	mg/L	0.695	-	0.695
Fósforo Total	mg/L	7.198	-	7.198
Detergentes	mg/L	7.947	-	7.947
pH	-	9.65	-	9.65
Temperatura (T)	°C	21.7	-	21.7

4.4.1.2. Acondicionamiento del MBBR

El MBBR fue acondicionado en el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. A continuación, en la tabla 8 se muestran los materiales empleados.

➤ Dimensiones del reactor biopelícula de lecho móvil

El reactor fue adaptado en una estructura rectangular (largo: 60cm, ancho: 50 cm y altura: 50 cm) de vidrio con 6 mm de espesor a los laterales y 8 mm en la base (ver Figura 12).

Figura 12

Dimensiones del reactor, cm

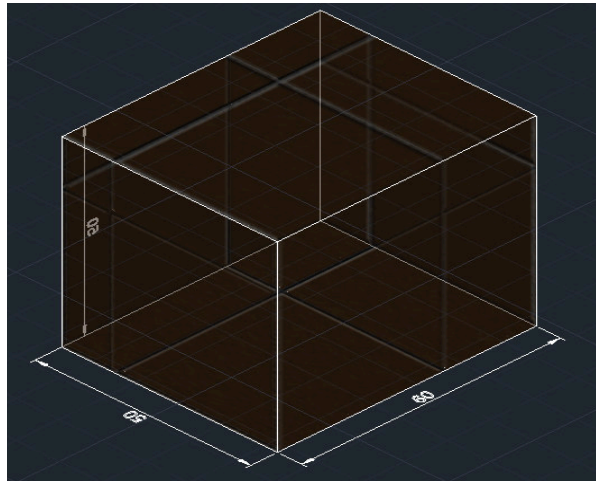


Tabla 8

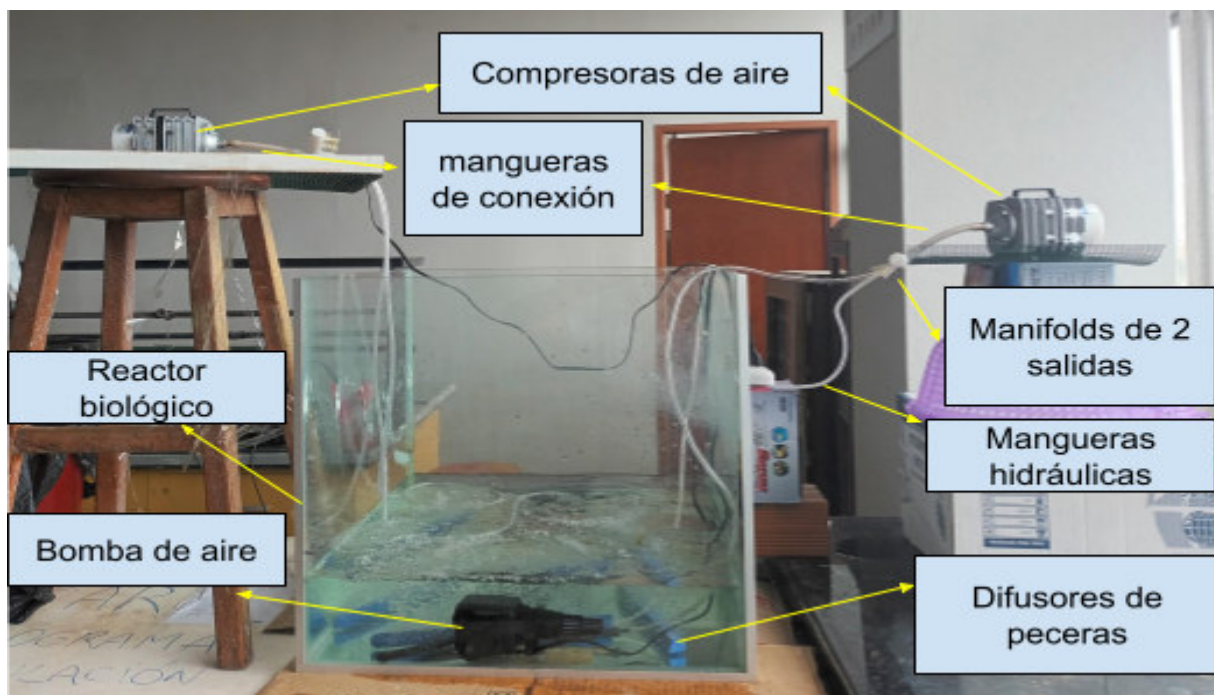
Lista de materiales

Materiales usados en el acondicionamiento		
Cantidad	Materiales	Función
02 u	Compresora de aire ($Q = 40$ L/min)	Aireación al reactor biológico
01 u	Reactor de vidrio de 6 mm de espesor en los laterales y 8 mm en la base	Reactor biológico
02 u	Bombas de aire	Generar movimiento en el reactor biológico
03 u	Difusores de pecera, 30 cm de largo	Distribuir el aire suministro en todo el reactor biológico y generar movimiento
01 u	Difusores de pecera, tipo cortina, de 30 cm	Distribuir el aire suministro en todo el reactor biológico y

02 u	Manifolds de dos salidas	generar movimiento Cambiar la salida del compresor en dos salidas
01 u	Manguera de conexión entre la salida del compresor y la entrada del manifolds de dos salidas	Unir la salida del compresor con el manifolds de dos salidas

Figura 13

Acondicionamiento del MBBR



➤ Pruebas hidráulicas en vacío

Antes de arrancar el reactor biológico, este fue sometido a una prueba hidráulica necesaria para asegurar su hermetismo e impermeabilidad, de acuerdo con las especificaciones técnicas de SEDAPAL, 2015. Para ello, se llenó el reactor con agua hasta alcanzar su nivel

máximo y se mantuvo durante 24 horas, dando resultados satisfactorios ya que no se presentaron fugas.

Figura 14

Imágenes de pruebas hidráulicas



➤ Aireación

La inyección de aire fue mediante dos compresoras de aire (SUN SUN, ACO -002) y distribuida uniformemente en el reactor por 04 difusores de pecera. El flujo de aire de cada compresora fue de 40 L/min, manteniendo una concentración de oxígeno disuelto de aproximadamente 4 mg/L durante todo el tratamiento. Adicionalmente se colocaron dos bombas de aire para lograr un movimiento adecuado de carriers y lodos dentro del reactor (ver Figura 14).

Figura 15

Compresora de aire SUN SUN, ACO -002



4.4.1.3. Fijación de microorganismos

Un inóculo puede consistir en un cultivo de microorganismos especializados que tienen atracción por un compuesto específico o puede ser un grupo de varias especies microbianas, ejemplo de ello son las que se encuentran en los lodos aerobios de las plantas de tratamiento de agua residuales (Mora et al., 2005). Huaynacho & Larico (2021) en su investigación fijaron microorganismos de una PTAR de la empresa Esmeralda Corp. al dar inicio al funcionamiento de su reactor biológico, mencionan que los microorganismos se aclimataron en un tiempo corto al agua residual a tratar y en consecuencia el reactor comenzó a funcionar adecuadamente.

La fijación de microorganismos se realizó con la finalidad de acelerar el desarrollo de la biopelícula en los carriers antes de iniciar el tratamiento de aguas grises procedente de la lavandería domiciliaria. Para ello se simulaban las condiciones del reactor MBBR con 50 Litros de agua potable y 2.6 Kg de carriers, asimismo, se le adicionaron 4.1261 g. de urea y 0.1410 g. de Dihidrogenofosfato de potasio (KH_2PO_4), las cuales fueron calculados como se muestran líneas abajo.

Posterior a ello se adicionó 1.5 L de lodos proveniente de una planta de lodos activados con un pH de 7.08, cabe mencionar que el proceso tuvo una duración de 60 días y se trabajó con un oxígeno disuelto aproximadamente igual a 4 mg/l.

Figura 16

Fijación de microorganismos en los carriers



Figura 17

Formación de biopelícula en los carriers



- **Nutrientes necesarios (nitrógeno y fósforo) para el correcto funcionamiento del MBBR.**

En base a la relación DQO:N:P igual a 100:5:1, surgen las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1. Valor final de N

$$V_{f(N)} = DQO * \frac{5}{100}$$

Ecuación 2. Valor final de P

$$V_{f(P)} = DQO * \frac{1}{100}$$

Donde:

DQO: Demanda química de oxígeno en el agua gris a tratar en mg/l.

$V_{f(N,P)}$: Valor final de N, P en mg/l.

Datos:

DQO: 781 mg/l

$$V_{f(N)} = 784.1 \frac{mg}{l} * \frac{5}{100}$$

$$V_{f(N)} = 39.205 \frac{mg}{l}$$

$$V_{f(P)} = 784.1 \frac{mg}{l} * \frac{1}{100}$$

$$V_{f(P)} = 7.841 \frac{mg}{l}$$

Ecuación 3. Masa del nutriente (N,P) a adicionar

$$m_{a(N,P)} = (V_{f(N,P)} - V_{i(N,P)}) * V * \frac{1g}{1000 mg}$$

Donde:

$m_{a(N,P)}$: Masa del nutriente (N, P) a adicionar en g.

$V_{f(N,P)}$: Valor final del nutriente (N, P) en mg/l.

$V_{i(N,P)}$: Valor inicial del nutriente (N, P) en mg/l.

V : Volumen de agua a tratar en el reactor en L.

Datos:

Valor inicial del nitrógeno: 0.695 mg/l

Valor inicial del fósforo: 7.198 mg/l

$$m_{a(N)} = (39.205 \frac{mg}{l} - 0.695 \frac{mg}{l}) * 50L * \frac{1g}{1000 mg}$$

$$m_{a(N)} = 1.9255 g.$$

$$m_{a(P)} = (7.841 \frac{mg}{l} - 7.198 \frac{mg}{l}) * 50L * \frac{1g}{1000 mg}$$

$$m_{a(P)} = 0.03215 g.$$

La elección de la fuente de nitrógeno y fósforo dependerá de diversos factores como la estabilidad, manejo, costo, disponibilidad, etc. Las fuentes de N y P usadas en esta investigación fueron la urea (CH_4N_2O) y Dihidrogenofosfato de potasio (KH_2PO_4) respectivamente, ya que se contaban con la disponibilidad.

Ecuación 4. Masa de la fuente del nutriente (N,P) a adicionar

$$M_a = m_{a(N,P)} * \frac{g./mol \text{ de fuente}}{g./mol \text{ del nutriente (N,P)}}$$

M_a : Masa de la fuente del nutriente (N y P) a adicionar en g.

$m_{a(N,P)}$: Masa del nutriente (N, P) a adicionar en g.

$$M_{CH_4N_2O} = 1.9255 g. N * \frac{60 g/mol \text{ de } CH_4N_2O}{28 gr/mol \text{ de } N}$$

$$M_{CH_4N_2O} = 4.1261 \text{ g.}$$

$$M_{KH_2PO_4} = 0.03215 \text{ g. } P * \frac{136 \text{ g/mol de } KH_2PO_4}{31 \text{ gr/mol de } P}$$

$$M_{KH_2PO_4} = 0.1410 \text{ g.}$$

➤ **Volumen y masa de carriers usados para la fijación de los microorganismos**

Datos:

Volumen de aguas grises a tratar: 50L

% llenado de carriers: 40 %

Densidad del carrier: $\frac{130 \text{ kg}}{m^3}$

Ecuación 5. Volumen de carriers

$$V_c = V * (\% \text{ carrier}) * \frac{m^3}{1000 \text{ L}}$$

Donde:

V_c : Volumen de carriers en m^3 .

V : Volumen de agua a tratar en el reactor en L.

% de carrier: Porcentaje de llenado.

$$V_c = 50 \text{ L} * (40\%) * \frac{m^3}{1000 \text{ L}}$$

$$V_c = 0.02 \text{ m}^3$$

Ecuación 6. Masa de carriers

$$m_c = V_c * (\rho_{\text{carrier}})$$

Donde:

m_c : Masa de carriers en Kg.

V_c : Volumen de carriers en m^3 .

ρ_{carrier} : Densidad de carrier en Kg/m^3 .

$$m_c = V_c * (\rho_{\text{carrier}})$$

$$m_c = 0.02 \, m^3 * \left(\frac{130 \, kg}{m^3}\right)$$

$$m_c = 2.6 \, Kg.$$

➤ Especificaciones técnicas de los carriers

Tabla 9

Especificaciones técnicas de los carriers

Especificación	Descripción
Material	Polímero modificado
Diámetro	10 mm
Rango de °T	-35°C a 65°C
Superficie	900 m ² /m ³
Peso	130 Kg/m ³

4.4.1.4. Arranque del MBBR

Posterior a la etapa de fijación de microorganismos y el desarrollo de una biopelícula visible en los carriers, se procedió a retirar el agua y los carriers contenidos del reactor para almacenarlos en otro recipiente. Seguidamente se llenaron 50 L de aguas grises procedente de lavandería domiciliaria al reactor y se cargaron los carriers procedentes de la etapa de fijación de microorganismos. Debido a que el pH de aguas grises era alcalino con un valor igual a 9.65, se tuvo que adecuarlo adicionando ácido sulfúrico para llevarlo dentro del rango de 6-9. Además, se le adicionaron 4.1261 g. de urea y 0.1410 g. de Dihidrogenofosfato de potasio (KH₂PO₄) como nutrientes de nitrógeno y fósforo.

La primera toma de muestra se realizó en un tiempo de residencia hidráulica igual a 6 horas para la medición de DQO, la segunda toma a las 26 horas para medir DQO y DBO₅ y la tercera toma a las 46 horas de tratamiento para la medición de DQO, DBO₅ y detergentes. Se realizó un seguimiento del pH, temperatura y oxígeno disuelto durante el tratamiento en el reactor.

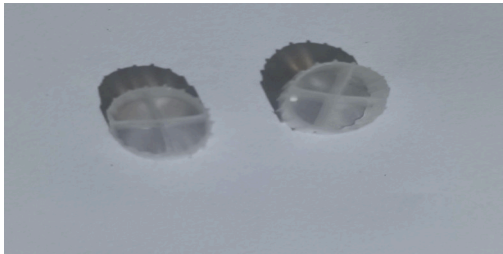
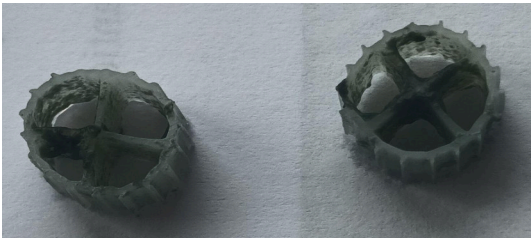
Figura 18

Reactor MBBR en funcionamiento



Figura 19

Carriers antes y después del tratamiento

Carrier antes del tratamiento	Carrier después del tratamiento
	

4.4.1.5. Determinación del porcentaje de remoción

La eficiencia de remoción de la DQO, DBO₅ y detergentes se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Porcentaje de remoción

$$\eta = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100 \%$$

Donde:

η : porcentaje de remoción

C_o : Valor inicial de DQO, DBO₅ y detergentes en mg/l

C_f : Valor final de DQO, DBO₅ y detergentes en mg/l

4.4.2. Técnicas e instrumentos de recolección de información

4.4.2.1. Técnicas

Se utilizó la observación como una técnica de recolección de datos con la finalidad de determinar el porcentaje de remoción de la DQO y DBO₅ y detergentes en aguas grises provenientes de una lavandería domiciliaria, variando el tiempo de residencia hidráulica. Esta técnica fue de mucha importancia ya que permitió registrar y analizar los datos de manera objetiva y sistemática para determinar la relación entre los tiempos de residencia hidráulica y las eficiencias de remoción de la DQO y DBO₅ y detergentes. Además, el análisis documental como técnica de recolección de datos fue útil para obtener datos e información relevante.

Instrumentos

Para el desarrollo de esta investigación, se emplearon los siguientes instrumentos para la recolección de datos:

- Ficha de recolección de datos (ver Anexo).
- Cámara fotográfica
- Computadora portátil

4.5. Análisis estadístico

El presente estudio empleó el análisis de correlación como análisis estadístico, donde es una prueba estadística que evalúa la relación que puede existir entre dos variables cuantitativas, este análisis se realizó por medio del software (Statistical Package for the Social Sciences, SPSS). Las variables se denominan comúnmente como independiente (variable X) y dependiente (variable Y). El objetivo de esta prueba es determinar si existe una relación entre ambas variables, es decir, si la variación de una influye en el comportamiento de la otra o viceversa. Por otro lado, los coeficientes de correlación cuantifican el grado de asociación lineal entre dos variables, indicando tanto la fuerza como la dirección de la correlación. Tales coeficientes de correlación se encuentran generalmente entre -1.00 y +1.00, como se detalla a continuación (Borda et al., 2011):

- 1.00 ← correlación negativa perfecta
- 0.95 ← correlación negativa fuerte
- 0.50 ← correlación negativa moderada
- 0.10 ← correlación negativa débil
- 0.00 ← ninguna correlación

- 0.10 ← correlación positiva débil
- 0.50 ← correlación positiva moderada
- 0.95 ← correlación positiva fuerte
- 1.00 ← correlación positiva perfecta

CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. Presentación y análisis de los resultados

5.1.1. Caracterización de la muestra de aguas grises sin tratamiento

En el proceso de tratamiento MBBR de aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, se caracterizó la muestra de aguas grises procedente de lavandería domiciliaria, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10

Caracterización del agua gris proveniente de lavandería domiciliaria, sin tratamiento.

Parámetros	Unidad	Valor
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	429.7
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	805.8
Nitrógeno Total	mg/L	0.695
Fósforo Total	mg/L	7.198
Detergentes	mg/L	7.947
pH	-	9.65
Temperatura (T)	°C	21.7

5.1.2. Medición del pH, temperatura y OD en el tratamiento MBBR

Durante el tratamiento se midieron variables de proceso como el pH, temperatura y OD para controlar el funcionamiento del MBBR.

5.1.2.1. Medición del pH en función del TRH

Tabla 11

Valores de pH según el tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento

TRH (horas)	pH
0.5	8.08
4	8.05
8	7.98
20	7.84
24	7.79
26	7.75
28	7.73
32	7.72
44	7.65
46	7.60

5.1.2.2. Medición de la temperatura en función del TRH

Tabla 12

Valores de temperatura en función del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento

TRH (horas)	Temperatura (°C)
0.5	25.3
4	25.4
8	25.7
20	25.6
24	26.0
26	25.9
28	25.9
32	25.7
44	25.5
46	25.3

5.1.2.3. Medición del oxígeno disuelto en función del TRH

Tabla 13

Valores de oxígeno disuelto dependiendo del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el tratamiento

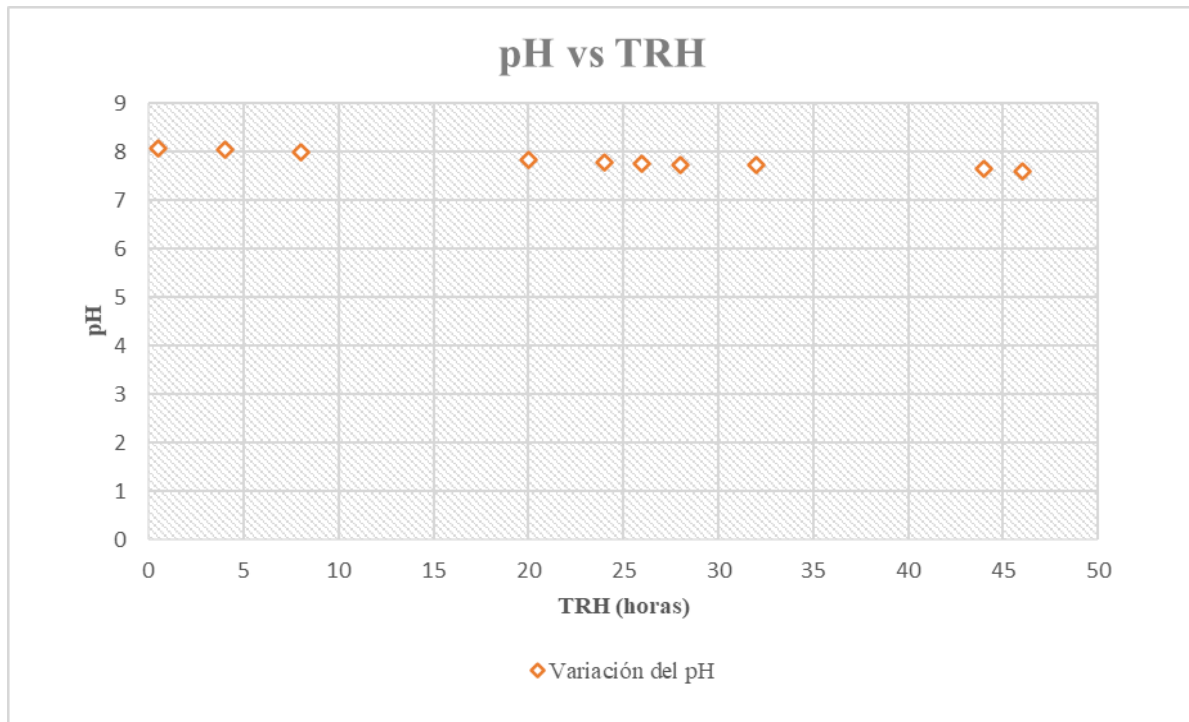
TRH (horas)	Oxígeno disuelto (mg/l)
0.5	4.66
4	4.40
8	4.30
20	4.10
24	4.20
26	4.15
28	4.12
32	4.12
44	4.08
46	4.12

5.1.3. Variación del pH, temperatura y OD en el tratamiento MBBR

5.1.3.1. Variación del pH en relación con el TRH

Gráfico 8

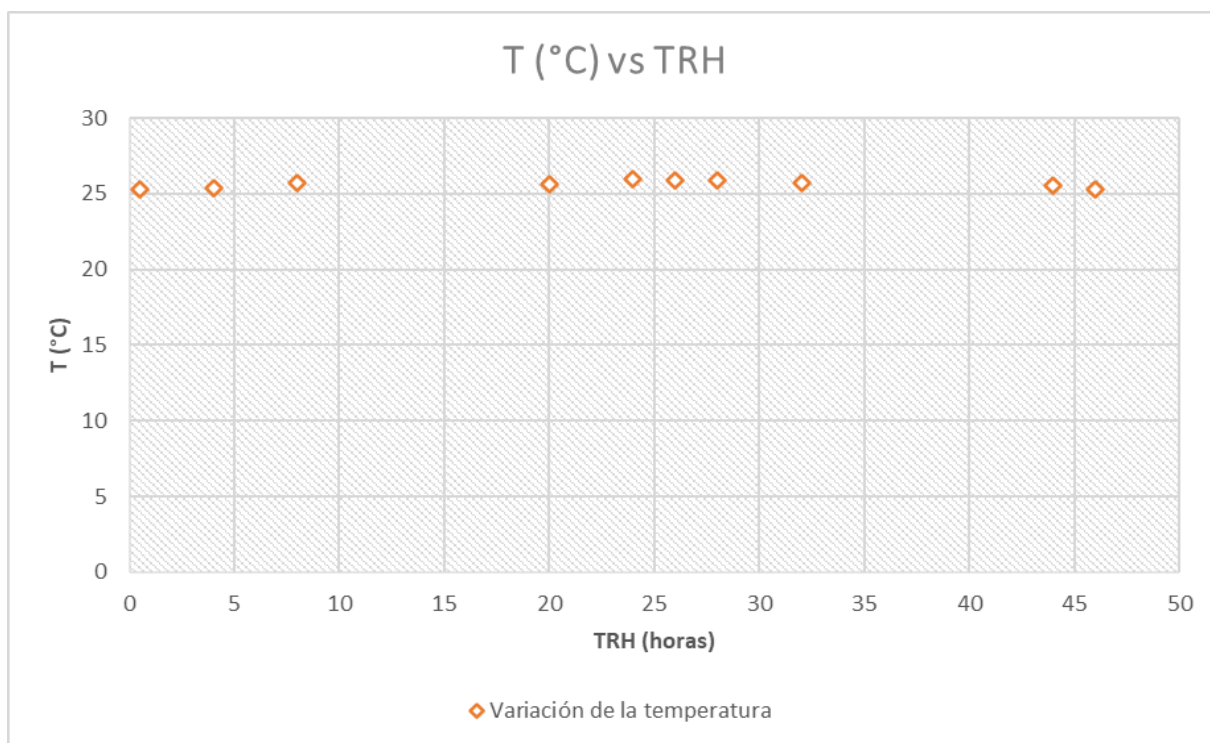
Variación del pH en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)



5.1.3.2. Variación de la temperatura en relación con el TRH

Gráfico 9

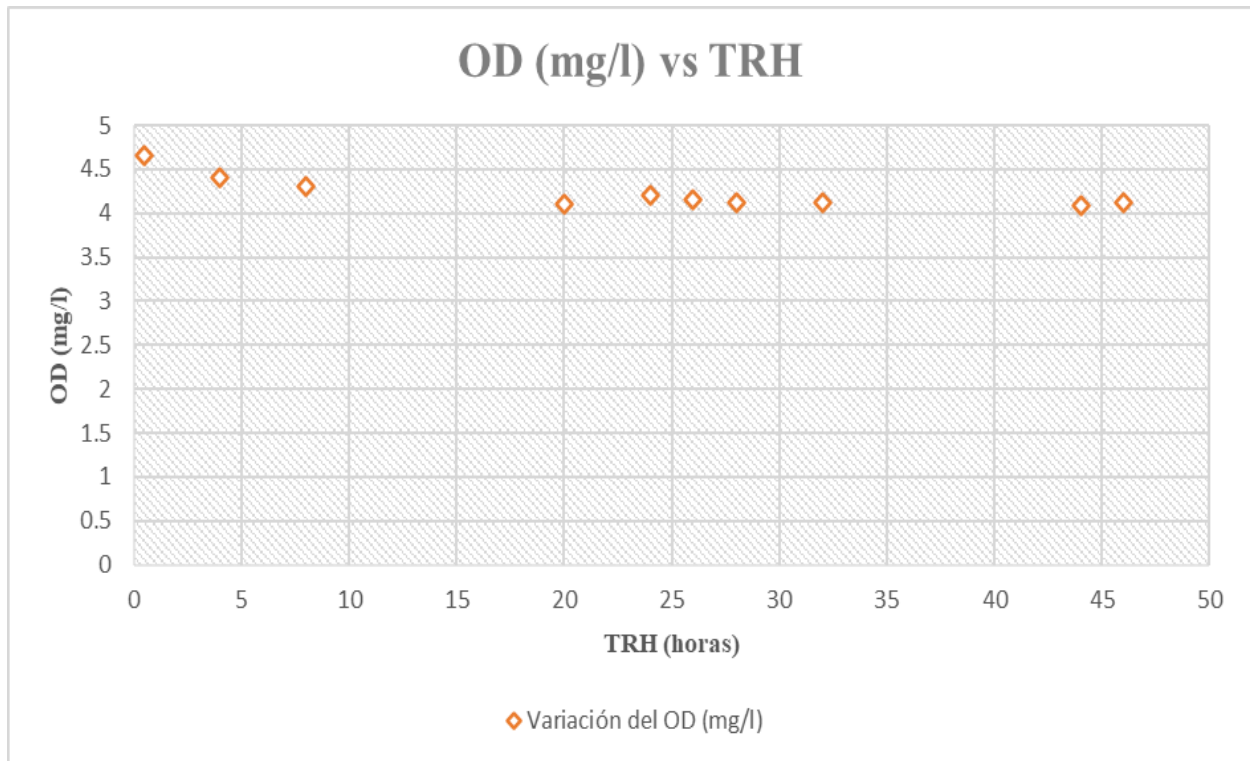
Variación de la temperatura en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)



5.1.3.3. Variación del OD en relación con el TRH

Gráfico 10

Variación del oxígeno disuelto en relación con el tiempo de residencia hidráulica (TRH)



5.1.4. Influencia del tiempo de residencia hidráulica

En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos al emplear el sistema MBBR en las aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, bajo diferentes tiempos de residencia hidráulica. A continuación, se detallan las condiciones de operación:

- Volumen de aguas residuales: 50 L
- Tipo de operación: Batch
- Porcentaje de llenado de carrier : 40%

Tabla 14*Influencia del tiempo de residencia hidráulica (TRH) en el proceso de MBBR*

TRH (Horas)	Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/l	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) mg/l	Detergentes (SAAM) mg/l
0	805.8	429.7	7.947
6	611.4	-	-
26	191.8	75.6	-
46	53.6	25.6	0.104

5.1.5. Remoción de DQO, DBO₅ y Detergentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria.

Tabla 15*Porcentajes de remoción de DQO, DBO₅ y detergentes con variaciones de TRH*

TRH (Horas)	% DE REMOCIÓN		
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	Detergentes (SAAM)
0	0 %	0 %	0 %
6	24.13 %	-	-
26	76.20 %	82.41 %	-
46	93.35 %	94.04 %	98.69 %

Gráfico 11

Porcentaje de remoción de DQO en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria por MBBR

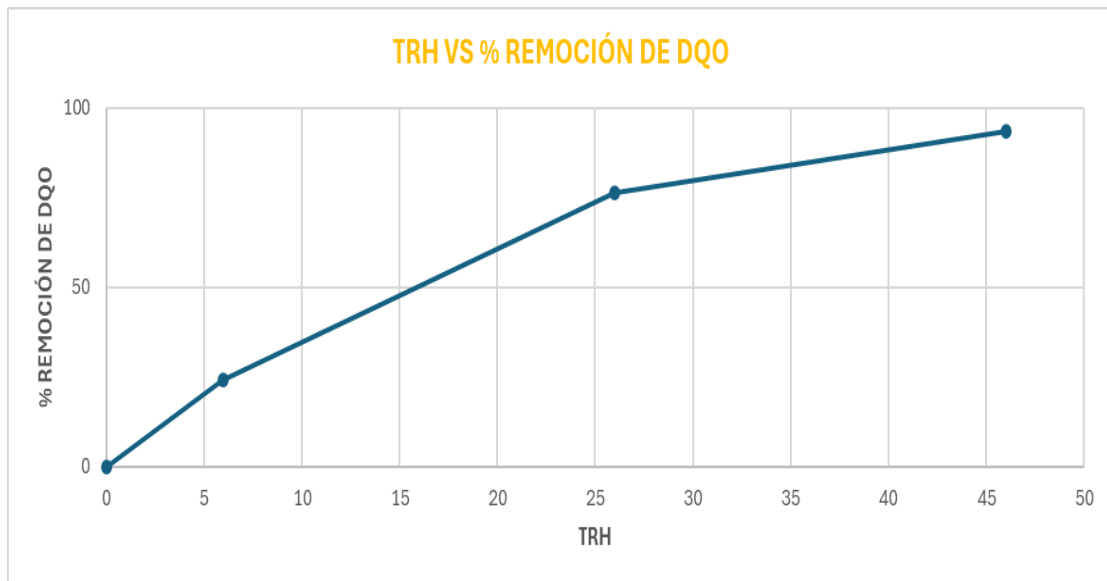
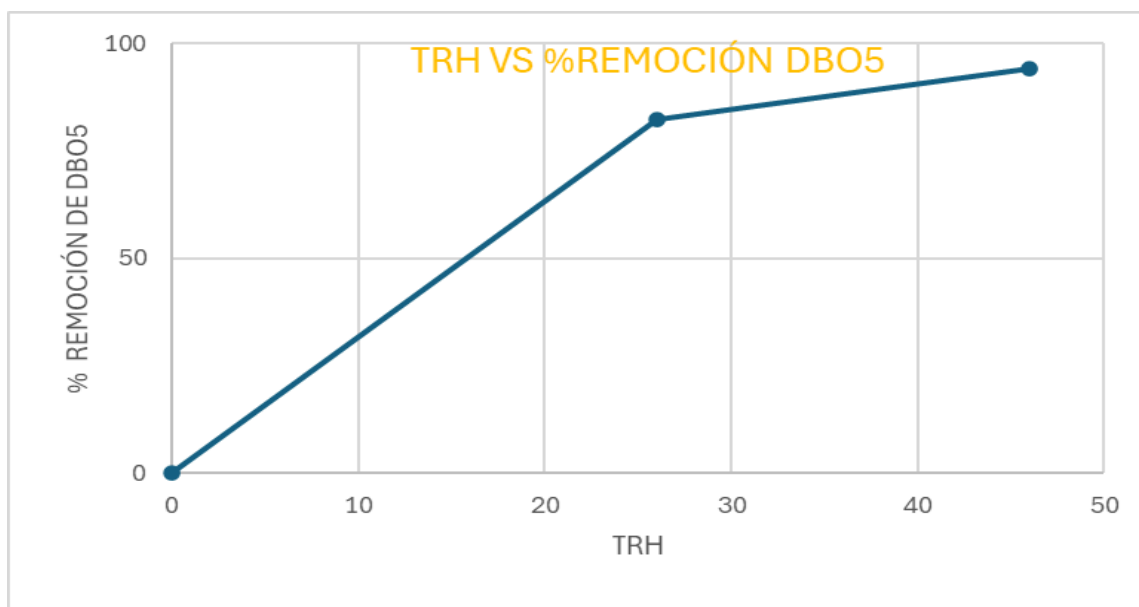


Gráfico 12

Porcentaje de remoción de DBO5 en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria por MBBR



5.2. Análisis estadístico de las variables

Para el análisis estadístico de las variables se hará uso de la prueba de correlación de dos variables utilizando el software SPSS. La correlación mide el grado de asociación entre dos variables, es decir, si estas dos variables tienen relación o no. Para saber que tipo de correlación se va aplicar, ya sea Pearson (cuando la variable sigue una distribución normal y se fundamenta en la estadística paramétrica) o Spearman (cuando la variables no sigue una distribución normal y se fundamenta en la estadística no paramétrica) se realiza una prueba de normalidad.

Prueba de normalidad

Para la prueba de normalidad se sigue los siguientes pasos:

- Plantear la hipótesis de normalidad.

H_0 = Hipótesis nula = Los datos siguen una distribución normal

H_1 = Hipótesis alterna = Los datos no siguen una distribución normal

- Validar el nivel de significancia de la hipótesis de normalidad

Generalmente, se asume un NC (Nivel de confianza) = 0.95 y α (Margen de error) = 0.05

- Aplicar la estadística según el tamaño de muestra.

Si el n = tamaño de muestra >50 se aplica Kolmogorov - Smirnov.

Si el $n \leq 50$ se aplica Shapiro - Wilk.

En nuestro caso se tiene un tamaño de muestra menor a 50, por lo cual se aplica la estadística Shapiro - Wilk.

- Demostrar nuestra hipótesis de normalidad según el p-valor (mínimo valor de riesgo).

Si el p-valor < 0.05 se rechaza la H_0

Si el p-valor ≥ 0.05 se acepta la H_0 y se rechaza la H_1

Tabla 16

Pruebas de normalidad del tiempo de residencia hidráulica y la DQO

	PRUEBAS DE NORMALIDAD					
	Kolmogorov - Smirnov			Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA	0.241	4	.	0.934	4	0.619
REMOCIÓN DE DQO	0.238	4	.	0.926	4	0.572

Tabla 17

Pruebas de normalidad del tiempo de residencia hidráulica y la DBO₅

	PRUEBAS DE NORMALIDAD					
	Kolmogorov - Smirnov			Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA	0.201	3	.	0.994	3	0.856
REMOCIÓN DE DBO₅	0.344	3	.	0.841	3	0.217

Las tablas 16 y 17 analizan si los datos siguen una distribución normal utilizando el estadístico de Shapiro-Wilk, adecuado para muestras pequeñas. Los resultados indican que las variables estudiadas presentan un comportamiento normal (p valor superior a 0.05).

Coefficiente de correlación

El coeficiente de correlación es la siguiente:

X = variable independiente = Tiempo de residencia hidráulica

Y = variable dependiente = Valor de DQO y DBO_5

Para la prueba de correlación se sigue los siguientes pasos:

- Plantear la hipótesis de correlación

H_0 = Hipótesis nula = No existe correlación entre las variables “ X ” e “ Y ”

H_1 = Hipótesis alterna = Existe correlación entre las variables “ X ” e “ Y ”

- Validar el nivel de significancia de la hipótesis de normalidad

Del mismo modo que en la prueba de normalidad, se asume un NC (Nivel de confianza) = 0.95
y α (Margen de error) = 0.05

- Aplicar la estadística según la prueba de normalidad.

Si es paramétrica se aplica el Coeficiente de Pearson.

Si es no paramétrica se aplica Spearman.

En nuestro caso la prueba de normalidad para las variables resultó una distribución normal, por lo cual se aplica una estadística paramétrica y el coeficiente a utilizar es Pearson.

- Demostrar nuestra hipótesis de correlación según el p-valor (mínimo valor de riesgo).

Si el p-valor < 0.05 se rechaza la H_0

Si el p-valor ≥ 0.05 se acepta la H_0 y se rechaza la H_1

Tabla 18

Correlación entre tiempo de residencia hidráulica y % de remoción de DQO

		TRH	% remoción DQO
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA	Correlación de Pearson	1	0.966*
	Sig. (bilateral)		0.034
	N	4	4
% REMOCIÓN DQO	Correlación de Pearson	0.966*	1
	Sig. (bilateral)	0.034	
	N	4	4

*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)

En la tabla 18 se evalúa el p-valor tanto para el tiempo de residencia hidráulica como para el % de remoción de DQO, dado que ambos valores son menores a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que existe una relación entre ambas variables. Con respecto a la

correlación de Pearson se interpreta que la correlación es fuerte y positiva, es decir tiene una relación directa.

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN

En la caracterización de las aguas grises residuales se observó valores de nitrógeno total y fósforo total igual a 0.695 mg/l y 7.198 mg/l respectivamente, el bajo valor de nitrógeno es debido a que a diferencia de las aguas negras no se cuenta con fuentes de nitrógeno como por ejemplo la orina, sin embargo, sí se observó un mayor contenido de fósforo, lo cual se puede inferir que es debido al uso de detergentes para el lavado de ropa.

En los procesos biológicos con MBBR se requiere tener una relación de DQO:P:N igual a 100:5:1 (Bashaar, A., 2004), en base a esta relación se halló que existía una carencia de nutrientes y en mayor medida el nitrógeno, es por ello que la muestra se acondicionó adicionando nutrientes, urea como fuente de nitrógeno y Dihidrogenofosfato de potasio como fuente de fósforo.

Se midieron las variables de proceso como el pH, temperatura y OD porque son relevantes durante todo el tratamiento MBBR de las aguas grises (tabla 11, 12 y 13). Los resultados indicaron que presenta una ligera variación del pH en relación con el TRH (gráfico 8) donde se mantuvo en un rango de 7.6 a 8.08, la cual coincide con lo mencionado por Metcalf & Eddy (2003), ya que el pH adecuado para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es de 6 a 9. La variación de la temperatura en relación con el TRH (gráfico 9), por su parte, se mantuvo entre los 25.3°C a 26 °C, lo cual se encuentra dentro del rango adecuado de temperatura para el desarrollo biológico que es de 25°C a 35°C, un valor fuera de este rango provoca que los microorganismos biológicos se vuelvan inactivos por ende la digestión

aeróbica sea detenida (Metcalf & Eddy, 2003, p.55). Por último, la variación del oxígeno disuelto en relación con el TRH (gráfico 10) se mantuvo en el rango de 4.08 mg/L a 4.66 mg/L, lo cual indica un valor dentro de lo recomendado, ya que se establece que el nivel de oxígeno disuelto suficiente tanto para el metabolismo aeróbico como para la nitrificación debe ser superior a 2 mg/L, sin embargo, se debe tener un control sobre el oxígeno disuelto ya que valores insuficientes o excesivos obstaculizan la remoción de los contaminantes (Instituto del Agua, s.f.).

Los porcentajes de remoción para la DQO variando los tiempos de residencia hidráulica (TRH) a 6 horas, 26 horas y 46 horas fueron 24.13%, 76.20% y 93.35% respectivamente, los porcentajes de remoción de DBO₅ fueron 82.41% y 94.04% para TRH de 26 horas y 46 horas respectivamente y el porcentaje de remoción de Detergentes fue igual a 98.69 % para un TRH igual a 46 horas. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que a medida que aumenta el tiempo de residencia hidráulica aumentan los porcentajes de remoción de DQO y DBO₅ y que el mayor porcentaje de remoción se obtuvo con el TRH igual a 46 horas. Es por ello que el TRH es un factor importante en la eficiencia del proceso de tratamiento por MBBR, asimismo, es una variable operativa importante que puede controlarse fácilmente mediante un sistema de medición de tiempo (cronómetro).

En el análisis de correlación mediante el software SPSS, entre las variables como el tiempo de residencia hidráulica y los porcentajes de remoción de DQO y DBO₅, se inició primero validando que los datos cumplan con la prueba de normalidad aplicando el estadístico Shapiro - Wilk, la cual es adecuado para cantidades pequeñas de muestra. Los resultados muestran que los datos de cada una de las variables siguen una distribución de forma normal, dado que presentaron un p superior a 0.05. Posteriormente, se realizó la prueba de correlación

entre el tiempo de residencia hidráulica y el porcentaje de remoción de DQO, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, la cual se aplica para datos que presentan una distribución normal. El resultado indicó un p igual a $+0.034$, que es menor a 0.05 , lo que confirma la existencia de una relación directa entre estas variables.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- De la caracterización de las aguas grises se observa que la relación DBO_5/DQO (>0.5) nos indica que la materia orgánica es fácilmente removible por la acción bacteriana y con una oxigenación adecuada, lo que sugiere su biodegradabilidad.
- Se logró realizar la fijación de microorganismos en los carriers, que son los que van a realizar la degradación de la materia orgánica y de los principales contaminantes.
- De la evaluación del TRH con el porcentaje de remoción de los principales contaminantes se observa que los porcentajes de remoción de la DBO_5 , DQO y detergentes están en relación directa, ya que se incrementan conforme al aumento del tiempo de residencia hidráulica de las aguas grises en el MBBR.
- De las mediciones de las variables de proceso como el pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD) se observó que se mantuvieron dentro del rango óptimo para la operación del MBBR, garantizando el desarrollo y la actividad de los microorganismos biodegradadores y así contribuyendo en una remoción efectiva.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda desarrollar un sistema de aireación adecuado para asegurar la fijación de microorganismos al utilizar nuevos carrier mediante lodos activados de plantas o inóculos, para ello es necesario verificar que contengan los nutrientes adecuados para su desarrollo y un tiempo de residencia hidráulica óptimo.
- Es fundamental verificar las variables de proceso antes de iniciar la operación en el MBBR. Variables como el pH, temperatura y OD deben mantenerse dentro del rango óptimo para no afectar la eficiencia del sistema de tratamiento.
- Es necesario realizar una prueba de vacío con agua potable en el MBBR para verificar la correcta disposición de los difusores de burbuja fina. Esta prueba ayudará a evitar la formación de puntos muertos con poca agitación, lo cual podría desfavorecer la acción de lecho móvil generando la acumulación y saturación de los carriers.
- Los microorganismos biodegradadores empleados en este estudio provienen de un tratamiento de lodos activados convencionales, por lo que se recomienda que futuras investigaciones utilicen inóculos de plantas reales que emplean esta misma tecnología.
- Existen otras alternativas de soporte o carriers con mayor área superficial, lo que facilita la fijación de una mayor cantidad de microorganismos.
- Es fundamental analizar la calidad del lodo generado en este estudio para determinar si es adecuado para su uso como fertilizante agrícola, lo que podría agregar valor a este tipo de estudio.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. AguaSigma. (s.f.). MBR NDN. <https://aguasigma.com/procesos/mbr-ndn/>
2. Anaya Meléndez, F., Espinosa Descalzo, E. N., Loayza Pérez, J. E., Zamudio Castillo, R. A., & Yáñez López, M. A. (2022). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas grises claras para reuso como agua de riego. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 88(1), 52-62.
3. Bashaar, A. (2004). Nutrients requirements in biological industrial wastewater treatment. *African Journal of Biotechnology*, 3 (4), 236-238. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/14950/0>
4. Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., ... & Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the total environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
5. Borda Pérez, M., Tuesta Molina, R., Navarro Lechuga, E. (2011). Métodos cuantitativos 3a. Ed. Herramientas para la investigación en salud. Colombia: Universidad del Norte.
6. Cárdenas Vera, A. K. A., & Minchola Alva, G. S. (2024). *Evaluación del polipropileno reciclado como medio de soporte en la remoción de materia orgánica de aguas residuales, mediante tratamiento aerobio* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/21472>
7. Chrispim, M. C., & Nolasco, M. A. (2017). Greywater treatment using a moving bed biofilm reactor at a university campus in Brazil. *J. Clean. Prod.*, 142 (1), 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.162>.

8. Contardo, O. (2024). *Estudio comparativo de tecnologías de tratamiento de aguas grises en reúso directo: caso club providencia [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil]*. Repositorio académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/200642>
9. Di Biase, A., Kowalski, M., Devlin, T., & Oleszkiewicz. Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Environmental Management*, 247, 849 - 866. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.053>
10. Espinosa - Ortiz, E., Gerlach, R., Peyton, B., Roberson, L., & Yeh, D. (2023). Biofilm reactors for the treatment of used water in space: potential, challenges, and future perspectives. *Biofilm*, 6 (100140). <https://doi.org/10.1016/j.biofilm.2023.100140>.
11. Fluence. (s.f.). ¿Cómo funciona el reactor de biofilm de membrana aireada?. <https://www.fluencecorp.com/es/como-funciona-mabr/>
12. George, A., Ancy, C. J., KR, A. R., Nair, J. P., & Nadayil, J. (2019). Characterisation of Grey Water and Treatment using Moving Bed Biofilm Reactor (Mbbr). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6, 1777-1780.
13. González, E. (2016). *Formación y Desarrollo de Biofilms: Su impacto en los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable*. [Especialización en Seguridad Alimentaria]. Universidad Nacional de la Plata.
14. HACH. (s.f.). Fósforo. <https://es.hach.com/parameters/phosphorus#:~:text=El%20f%C3%B3foro%20es%20un%20nutriente.receptoras%20de%20estas%20aguas%20residuales>.
15. HACH. (s.f.). Sólidos (Totales y Disueltos). <https://es.hach.com/parameters/solids>

16. Huaman-Buitron, N. A., Gómez-Lora, W., Zamora-Talaverano, N., & Jaco-Rivera, E. (2024). *Eficiencia de bioportadores de PET reciclado en reactores biológicos de lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales municipales*. *Ingeniería del agua*, 28(3), 213-236. <https://doi.org/10.4995/ia.2024.21862>
17. Instituto del Agua (s.f.). *Oxígeno Disuelto en Aguas Residuales: Importancia y Métodos de Medición en el Tratamiento de Aguas*. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/oxigeno-disuelto-en-aguas-residualesaguas-residuales/>
18. Instituto Nacional de Estadística e Informática (2022). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales* 2022. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1877/libro.pdf
19. Khajvand, M., Mostafazadeh, A. K., Drogui, P., & Tyagi, R. D. (2022). Management of greywater: environmental impact, treatment, resource recovery, water recycling, and decentralization. *Water Science & Technology*, 86(5), 909-937. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.226>
20. Khanam, K., & Patidar, S. K. (2022). Greywater characteristics in developed and developing countries. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1494-1499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.022>

21. Koul, B.; Yadav, D.; Singh, S.; Kumar, M.; & Song, M. (2022). *Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review*. *Water*, 4(21), 3542.
<https://doi.org/10.3390/w14213542>
22. Lambe, J. S., & Chougule, R. S. (2015). *Greywater-treatment and reuse*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 21.
23. Larico Rodriguez, M. W., & Huaynacho Vasquez, R. E. (2021). *Diseño y construcción de un reactor de biopelícula adherida a carriers en lecho fluidizado con coagulación para la evaluación de su rendimiento en la remoción de DBO5 y DQO en aguas residuales domésticas del distrito de Mollendo–Islay* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
<http://hdl.handle.net/20.500.12773/13908>
24. Larrea, A., Zalakain, G., Larrea, L., & Abad, A. (2004). Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales. CEIT.
25. Lazarova, V., Savoye, P., Janex, M. L., Blatchley, E. R., & Pommepuy M. (1999). Advanced wastewater Disinfection Technologies: State of the Art and Perspectives. *Water Science and Technology*, 40(4-5), 203-213.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00502-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00502-8)
26. 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, 122631.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122631>

27. Manna, S. (2018). Treatment of gray water for reusing in non-potable purpose to conserve water in India. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 13(8), 703-716.
28. Mayta Ccapa, T. P., Quispe Yucra, R. G., & Tito Luque, A. F. (2023). *Diseño experimental del tratamiento secundario con tecnología MBBR para aguas residuales provenientes del camal Municipal de Cotahuasi - La Unión - Arequipa 2022* (Tesis de licenciatura). Universidad Continental.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13873>
29. Mayarí, R., Espinosa, Ma. del C., & Gutiérrez, J. (2005). Validación de La Determinación de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas y Aguas Residuales. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 36.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620511015>.
30. Metcalf & Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: *Tratamiento, vertido y reutilización* (3ª ed.). McGraw - HILL/ INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
31. Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and Reuse* (4ª ed.). McGraw - Hill.
https://www.researchgate.net/profile/Shuokr_Qarani_Aziz/post/Does_any_one_has_Metcalf_Eddy-Wastewater_Engineering-Treatment_and_Reuse_4th_edition/attachment/5c9a90decfe4a7299498fd8f/AS%3A740806746984450%401553633500173/download/Wastewater+Eng+by+Mecalf+and+Eddy+%2C+2003.pdf
32. Microlab Industrial. (s.f). Surfactantes como S.A.A.M.
<https://www.microlabindustrial.com/parametros/materia-organica-agregada/587/surfactantes-como-s-a-a-m>

33. Muñoz Cruz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales.
34. Nhut, H. T., Hung, N. T. Q., Sac, T. C., Bang, N. H. K., Tri, T. Q., Hiep, N. T., & Ky, N. M. (2020). Removal of nutrients and organic pollutants from domestic wastewater treatment by sponge-based moving bed biofilm reactor. *Environmental Engineering Research*, 25(5), 652-658.
35. Noyola, A., Morgan, J., Guereca, L. (2013). *Selección de Tecnologías para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales*.
https://www.researchgate.net/publication/287975365_Seleccion_de_Tecnologias_para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Municipales_guia_de_apoyo_para_ciudades_pequenas_y_medianas
36. , Hung, N. T. Q., Sac, T. C., Bang, N. H. K., Tri, T. Q., Hiep, N. T., & Ky, N. M. (2020). Removal of nutrients and organic pollutants from domestic wastewater treatment by sponge-based moving bed biofilm reactor. *Environmental Engineering Research*, 25(5), 652-658.
37. Odegaard, H. The moving Bed Biofilm Reactor. En Igarashi, T, Watanabe, Y , Asano, T, and Tambo N., *Water Environment Engineering and Reuse of Water* (pp. 205 - 350). Hokkaido Press 1999.
38. Odegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process, *Water Science & Technology*, 53 (9), 77 - 33.
39. Ongena, S., Van de Walle, A., Mosquera - Romero, S., Driesen, N., Gutierrez, L., & Rabaey, K. (2023). Comparison of MBR and MBBR followed by UV or

- electrochemical disinfection for decentralized greywater treatment. *Water Research*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119818>
40. Pachkor, R. T., & Parbat, D. K. (2017). *A Literature Review on Integrated Approach for Grey Water Treatment*. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5(4).
41. Prashanna Rangan, R., & Heenalisha, K. (2019). *Grey-Water Treatment and Reuse: A Review*. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 8(1), 5–9. <https://doi.org/10.51983/ajsat-2019.8.1.1042>
42. Qadir, M., Jones, E., & Drechsel, P. (2024). Domestic wastewater generation, treatment, and agricultural reuse. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4427017/v1>
43. Rana, K., Shah, M., & Upadhyay, A. (2014). *Integrated approach towards grey water management*. *International journal of engineering sciences & research Technology*, 3(1), 239-242.
44. Rincón, A., Herrera, OF., & Ortiz, MF. (2014). Esquema para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 8(16), 29 - 40. <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/download/588/598/>
45. Rodrigues, K. C., de Morais, L. S. R., & de Paula, H. M. (2022). Green/sustainable treatment of washing machine greywater for reuse in the built environment. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100410>

46. Romero, J. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría o Principios de Diseño* (3^a ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería. https://www.academia.edu/41246680/Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Romero_Rojas
47. RWC TECHNOLOGIES & CONSULTING (28 de octubre 2022). Reactor de biofilm de membrana aireada. <https://www.rwctechnologiesdr.com/post/reactor-de-biofilm-de-membrana-aireada>
48. Safwat, M. (2019). Moving Bed Biofilm Reactors for Wastewater Treatment: A Review of Basic Concepts. *International Journal of Research*, 6 (10), 85 - 90. https://www.researchgate.net/publication/335664758_Moving_Bed_Biofilm_Reactors_for_Wastewater_Treatment_A_Review_of_Basic_Concepts
49. Saidi, A., Masmoudi, K., Nolde, E., El Amrani, B., & Amraoui, F. (2017). Organic matter degradation in a greywater recycling system using a multistage moving bed biofilm reactor (MBBR). *Water Science and Technology*, 76(12), 3328-3339. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.499>
50. Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M. (2024). Effect of washing method and detergent type on laundry greywater characteristics. *Journal of Water Process Engineering*, 66, 106103. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106103>
51. Stevens Salazar, E. I. (2021). *Implementación del reglamento sobre condiciones sanitarias para la reutilización de aguas grises: reúso residencial-análisis desde la experiencia comparada [Tesis de optar grado de Magíster, Universidad de Chile]*. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.
52. Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2022). *Informe de diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)*.

https://sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2022/06/Informe-de-diagnostico-de-las-Plantas-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-PTAR_VdigitalConcomentario.pdf

53. Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2024). *Informe N° 00018-2024-SUNASS-DF*.
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6875941/5945194-informe-n_00018-2024-sunass-df.pdf
54. Valencia, C. H. (2016). *Aguas residuales: una visión integral*. Colombia: Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
55. Van Haandel, A.C. & Van Der Lubbe, J.G.M. (2003). *Handbook of Biological Wastewater Treatment* (2da ed.). IWA Publishing.
56. Van de Walle, A., Kim, M., Alam, M. K., Wang, X., Wu, D., Dash, S. R., ... & Kim, J. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental science and ecotechnology*, 16, 100277.
<https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100277>
57. Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: Generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(22), 32397.

CAPÍTULO IX. ANEXOS

9.1. Cronograma de actividades

Calendario de actividades (septiembre - diciembre 2024)

ACTIVIDADES / SEMANAS	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión continua de bibliografía																
Toma y caracterización de muestra																
Acondicionamiento del reactor																
Pruebas experimentales																
Interpretación y evaluación de los resultados obtenidos																
Optimización de parámetros																
Evaluación del efluente																
Tratamiento estadístico																
Elaboración del informe final																
Sustentación de tesis																

9.2. Matriz de consistencia

	Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Unidad de medida	Instrumentos
General	¿Cómo afecta el tiempo de residencia hidráulica (TRH) en el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO ₅ y detergentes) presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria en un MBBR a nivel laboratorio?	Evaluar la relación entre el tiempo de residencia hidráulica y el porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO ₅ y detergentes) presentes en aguas grises provenientes de lavandería domiciliaria, en un MBBR a nivel laboratorio.	El porcentaje de remoción de los principales contaminantes (DQO, DBO ₅ y detergentes) presentes en las aguas grises proveniente de lavandería domiciliaria aumenta de manera proporcional al incremento en el tiempo de residencia hidráulica aplicado en un MBBR a nivel de laboratorio.	Variable X Independiente: - Tiempo de residencia hidráulica Variable Y dependiente: -DQO -DBO ₅ -Detergentes	-Horas -mg/L -mg/L -mg/L	-Cronómetro -Análisis en laboratorio externo (ALAB) - Método APHA 5220 -Análisis en laboratorio externo (ALAB) - Método APHA 5210 -Análisis en laboratorio externo (ALAB) - Método APHA 5540

Específi cos		• Caracterizar los principales contaminantes de aguas grises provenientes de la lavandería domiciliaria para determinar los parámetros específicos a evaluar. • Realizar la fijación de microorganismos en los carriers. • Evaluar la relación de los tiempos de residencia hidráulica a 26 horas y 46 horas con el porcentaje de remoción de los principales contaminantes a un porcentaje de llenado de carriers del 40% respecto al volumen de aguas grises a tratar.				
-----------------	--	--	--	--	--	--

9.3. Cálculos del porcentaje de remoción de la DQO y la DBO₅

9.3.1. Determinación del porcentaje de remoción DQO en tiempo de residencia hidráulica

igual a 6 horas, 26 horas y 46 horas.

- Cálculo del porcentaje de remoción de la DQO a las 6 horas de tiempo de residencia hidráulica.

Ecuación 6. Porcentaje de remoción

$$\eta = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100 \%$$

Se tiene: $C_o = C(DQO)_o = 805.8 \text{ mg/l}$, $C_f = C(DQO)_f = 611.4 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación anterior.

$$\eta = \frac{(805.8 - 611.4)}{805.8} \times 100 \%$$

$$\eta = 24.13 \%$$

- Cálculo del porcentaje de remoción de la DQO a las 26 horas de tiempo de residencia hidráulica.

Se tiene: $C_o = C(DQO)_o = 805.8 \text{ mg/l}$, $C_f = C(DQO)_f = 191.8 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación 6.

$$\eta = \frac{(805.8 - 191.8)}{805.8} \times 100 \%$$

$$\eta = 76.20 \%$$

- **Cálculo del porcentaje de remoción de la DQO a las 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.**

Se tiene: $C_o = C(DQO)_o = 805.8 \text{ mg/l}$, $C_f = C(DQO)_f = 53.6 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación 6.

$$\eta = \frac{(805.8 - 53.6)}{805.8} \times 100 \%$$

$$\eta = 93.35 \%$$

9.3.2. Cálculo del porcentaje de remoción de la DBO₅ a las 26 horas y 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.

- **Cálculo del porcentaje de remoción de la DBO₅ a las 26 horas de tiempo de residencia hidráulica.**

Se tiene: $C_o = C(DBO5)_o = 429.7 \text{ mg/l}$, $C_f = C(DBO5)_f = 75.6 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación 6.

$$\eta = \frac{(429.7 - 75.6)}{429.7} \times 100 \%$$

$$\eta = 82.41 \%$$

- **Cálculo del porcentaje de remoción de la DBO₅ a las 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.**

Se tiene: $C_o = C(DBO5)_o = 429.7 \text{ mg/l}$, $C_f = C(DBO5)_f = 25.6 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación 6.

$$\eta = \frac{(429.7 - 25.6)}{429.7} \times 100 \%$$

$$\eta = 94.04 \%$$

9.3.3. Cálculo del porcentaje de remoción de los detergentes a las 46 horas de tiempo de residencia hidráulica.

Se tiene: $C_o = C(\text{Detergentes})_o = 7.947 \text{ mg/l}$, $C_f = C(\text{Detergentes})_f = 0.104 \text{ mg/l}$

Reemplazando en la ecuación 6.

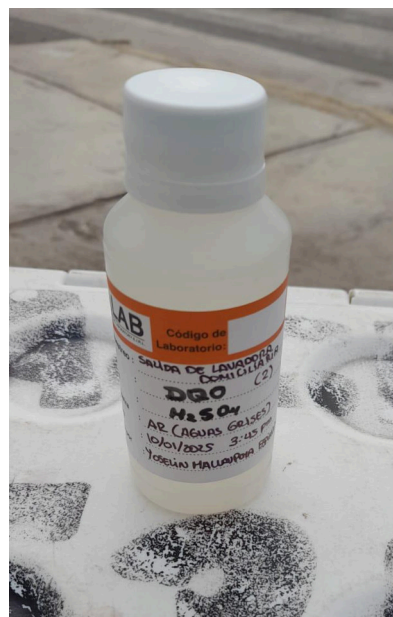
$$\eta = \frac{(7.947 - 0.104)}{7.947} \times 100 \%$$

$$\eta = 98.69 \%$$

9.4. Evidencia fotográfica de las mediciones de parámetros pH, temperatura y oxígeno disuelto en el tratamiento



9.5. Toma de muestra al inicio, a las 6, 26 y 46 horas del tratamiento



9.6. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises sin tratamiento



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE
ACREDITACION INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-34300

N° Id.: 0000133063

V.- RESULTADOS

ITEM	1			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-101817			
CÓDIGO CLIENTE ⁽¹⁾	SALIDA DE LAVADORA DOMICILIARIA			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ⁽¹⁾	E:0282101.35 N:8676742.302			
PRODUCTO ⁽¹⁾	Agua Residual			
SUB PRODUCTO ⁽¹⁾	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO ⁽¹⁾	15-11-2024 11:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,4	2,0	467,1
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	143,00
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	784,1
Detergentes (*)	mg/L	0,007	0,020	7,947
Fósforo Total (*)	mg/L	0,004	0,010	7,198
Nitrógeno Total ²	mg/L	0,050	0,120	0,695

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA.

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *c* = Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *c* = Menor que el L.D.M.

⁽¹⁾ Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

9.7. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises a las 6 horas de tratamiento

logo Alab logo inacal

INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-40305

V.- RESULTADOS

ITEM	1			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-24-120764			
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	SALIDA DE LAVADORA DOMICILIARIA			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)	E:02688644.51 N:8665845.126			
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual			
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	24-12-2024 12:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	611,4

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<" Menor que el L.D.M.

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

9.8. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises sin tratamiento y a las 26 horas de tratamiento

logo Alab logo inacal

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-978

V.- RESULTADOS

ITEM				1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-002208	M-25-002209
CÓDIGO CLIENTE ^(*)				SALIDA DE LAVADORA DOMICILIARIA	SALIDA DE LAVADORA DOMICILIARIA
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(*)				E:0268644.51 N:8665845.126	E:0268644.51 N:8665845.126
PRODUCTO ^(*)				Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(*)				Agua Residual Doméstica	Agua Residual Doméstica
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(*)				10-01-2025 03:30	10-01-2025 03:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	392,3	75,6
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	827,6	191,8

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

^(*)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

9.9. Resultados de análisis de la muestra de aguas grises a las 46 horas de tratamiento

logo Alab logo inacal

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-988

V.- RESULTADOS

ITEM	1			
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-25-002228			
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	SALIDA DE LAVADORA DOMICILIARIA			
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(B)	E:0268644.51 N:8665845.126			
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual			
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Doméstica			
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(B)	11-01-2025 09:30			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	25,5
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	53,5
Detergentes - SAAM o Surfactants Anionic Surfactants as MBAS (*)	mg/L	0,008	0,020	0,104

^(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA.
L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *"<"= Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, *"<"= Menor que el L.D.M.

^(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

9.10. Ficha de recolección de datos

TRH (HORAS)	pH	Temperatura	OD