

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**EFFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTACTOR EN UN REACTOR DE
BIODISCOS A ESCALA DE LABORATORIO, EN LA REMOCIÓN DE CARGA
ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DEL COMEDOR UNAS**

Tesis

Para optar el título profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

CALERO CHOGAS, GIANELLA MARIA

Asesor:

ING. M.SC. CERNA CUEVA, ALBERTO FRANCO

Tingo María, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María- Perú
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°072-2026-FRNR-UNAS

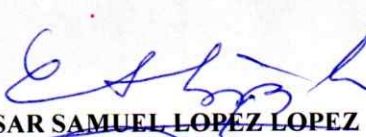
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 27 de abril de 2026, a horas 03:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTACTOR EN UN REACTOR DE BIODISCOS A ESCALA DE LABORATORIO, EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DEL COMEDOR UNAS”

Presentado por la Bachiller: **CALERO CHOGAS, GIANELLA MARIA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 15 de junio de 2026


Dr. CESAR SAMUEL LOPEZ LOPEZ
PRESIDENTE


Dr. LUIS EDUARDO ORÉ CIERTO
MIEMBRO


Mclgo. MSc. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ ROMERO
MIEMBRO




Ing. M. Sc. ALBERTO FRANCO CERNA CUEVA
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 213 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

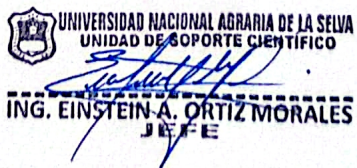
Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTACTOR EN UN REACTOR DE BIODISCOS A ESCALA DE LABORATORIO, EN LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DEL COMEDOR UNAS	CALERO CHOGAS, GIANELLA MARIA	06 % Seis	Menor a 20 %

Tingo María, 15 de julio de 2026.


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



**EFFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTACTOR EN UN REACTOR DE
BIODISCOS A ESCALA DE LABORATORIO, EN LA REMOCIÓN DE CARGA
ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DEL COMEDOR UNAS**

Autor	:	Calero Chogas, Gianella Maria
Asesor	:	Ing. M.Sc. Cerna Cueva, Alberto Franco
Área de investigación	:	Ciencia y Tecnologías Ambiental
Grupo de investigación	:	Ciencia y Tecnologías Ambiental
Línea de investigación	:	Tecnología para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	:	Comedor UNAS
Duración	:	6 meses
Financiamiento	:	S/. 2,054.96
FEDU	:	No
Propio	:	Sí
Otros	:	No

Tingo María, 2026

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida y permitirme compartir una de mis metas con mi familia. Él siempre me acompaña y me ama; me ha abrazado espiritualmente en los momentos en que la situación me ha sobrepasado y, con infinita bondad, siempre dispone a alguien para hablarme a su manera: tan especial, tan calmada, llena de paz y de un inmenso amor.

A mis amados padres, Wilfredo y Etty, ambos han trabajado incansablemente para que pueda culminar satisfactoriamente mis estudios. Su constante preocupación, el apoyo incondicional y las palabras llenas de amor me brindaron la fortaleza necesaria para continuar, aun estando lejos de casa. Por ello, hoy deseo honrarles por su paciencia, esfuerzo y profundo amor hacia mí, los amo mucho.

A mis queridos hermanos, Johan y Eritson, quienes desde el primer momento confiaron en que lo lograría. Son la razón por la que me siento orgullosa de haber culminado mis estudios universitarios y la motivación constante para seguir avanzando profesionalmente, los amo profundamente.

A quien amo con todo mi corazón: mi hermosa sobrina Eypril. Tu nacimiento fue una gran bendición para nuestra familia, y desde que llegaste, tu vida ilumina la mía cada día. Te amamos infinitamente, lechoncita.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Agraria de la Selva, mi alma máter, por brindarme el espacio donde me he formado profesionalmente y por albergarme durante mis años de estudios dentro de sus instalaciones, especialmente en la residencia y el comedor universitario. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mis estimados docentes, quienes me compartieron sus conocimientos y experiencias.

A mi asesor, el Ing. M.Sc. Alberto Franco Cerna Cueva, por su guía invaluable en este proceso. Agradezco profundamente su paciencia al compartir sus conocimientos, así como su apoyo constante y los consejos oportunos que permitieron llevar a buen término la realización de esta tesis.

Expreso mi gratitud a los señores miembros del jurado calificador: Dr. Cesar Samuel Lopez Lopez, Dr. Luis Eduardo Oré Cierzo y Mblgo. M.Sc. Luis Alberto Sánchez Romero, por la amabilidad y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo. Sus sugerencias y observaciones fueron fundamentales para fortalecer el rigor y la calidad de la presente investigación.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo general	2
1.1.2.	Objetivos específicos	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	Antecedentes	3
2.1.1.	Internacional	3
2.1.2.	Nacional	4
2.1.3.	Local	6
2.2.	Biodiscos	6
2.3.	Biopelículas en tratamiento de aguas	7
2.4.	Norma OS.090	8
2.5.	Material de biodiscos	8
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1.	Lugar de ejecución	11
3.1.1.	Ubicación política de la zona de estudio	11
3.1.2.	Clima	11
3.2.	Materiales y equipos	12
3.2.1.	Materiales	12
3.2.2.	Equipos	12
3.2.3.	Insumos	12
3.2.4.	Software	13
3.3.	Tipo de investigación	13
3.3.1.	Nivel de investigación	13
3.3.2.	Variables en estudio	14

3.3.3.	Diseño de la investigación.....	14
3.3.4.	Análisis estadístico	14
3.4.	Metodología.....	15
3.4.1.	Caracterización de la carga orgánica del agua residual del comedor UNAS	15
3.4.2.	Diseño de un sistema de contactores biológicos a escala laboratorio	17
3.4.3.	Efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos en la remoción de carga orgánica.....	18
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	21
4.1.	Caracterización de la carga orgánica del agua residual del comedor UNAS	21
4.2.	Diseño de un sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.....	23
4.3.	Efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos en la remoción de carga orgánica	25
4.3.1.	Efecto del material del contactor biológico	26
4.3.2.	Efecto de la rugosidad	28
4.3.3.	Efecto de los tiempos de retención hidráulica	29
4.3.4.	Efecto de las interacciones	30
V.	CONCLUSIONES	33
VI.	PROPUESTA A FUTURO.....	34
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
VIII.	ANEXOS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Indicadores fisicoquímicos y métodos analíticos aplicados.....	16
2. Diseño experimental factorial ($2 \times 2 \times 2$) y esquema de recolección de datos.....	20
3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual del comedor.....	21
4. Análisis de varianza trifactorial del rendimiento del reactor RBC bajo diferentes condiciones de operación.....	26
5. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO_5 según el material del contactor.....	27
6. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO_5 según la textura superficial del contactor.....	28
7. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO_5 según el tiempo de retención hidráulica.....	30
8. Efecto conjunto del material y la textura del contactor en la eficiencia de remoción de DBO_5	31
9. Efecto del material del contactor y del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO_5	31
10. Efecto de la textura del contactor y del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO_5	32
11. Efecto combinado del material, la textura y el tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO_5	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.	Mapa de ubicación del lugar de ejecución.....11
2.	Recolección de muestra de agua residual en el buzón de desagüe del comedor universitario.....16
3.	Diseño y dimensiones del sistema de contactores biológicos rotatorios (RBC) a escala laboratorio.....25
4.	Distribución de la eficiencia de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos bajo diferentes combinaciones de material, textura superficial y tiempo de retención hidráulica.....26
5.	Efecto del material del contactor biológico en la eficiencia promedio de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos.....27
6.	Efecto de la rugosidad superficial en la eficiencia promedio de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos.....29
7.	Influencia del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia promedio de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos.....30
8.	Análisis de parámetros fisicoquímicos en laboratorio.....38
9.	Construcción del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.....38
10.	Configuración inicial del paquete de 44 discos sobre el eje horizontal rotatorio..39
11.	Acondicionamiento del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio..39
12.	Funcionamiento del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.....40
13.	Desarrollo de biopelícula en contactor biológico rotatorio (RBC).....40

RESUMEN

El tratamiento de aguas residuales mediante contactores biológicos rotatorios constituye una alternativa eficiente para la reducción de carga orgánica en efluentes domésticos. En este contexto, se evaluó la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en aguas residuales del comedor universitario de la Universidad Nacional Agraria de la Selva utilizando un sistema de biodiscos a escala laboratorio. El objetivo fue analizar el efecto del material del contactor, la rugosidad superficial y el tiempo de retención hidráulica (TRH) sobre el desempeño del sistema. Se aplicó un diseño experimental trifactorial 2×2×2, considerando dos materiales (polipropileno y CD), dos patrones de textura (lineal y puntos) y dos tiempos de retención (4 y 8 horas), con 24 unidades experimentales. El análisis de varianza mostró que los efectos principales de material, textura y tiempo fueron altamente significativos ($p < 0.0001$), siendo el TRH el factor de mayor influencia en la eficiencia de remoción. Asimismo, se identificó una interacción significativa entre material y textura, destacando la combinación polipropileno–puntos como la más eficiente. La mayor remoción de DBO₅ se obtuvo con la combinación polipropileno–puntos–8 h, con valores cercanos al 77 %, mientras que la menor eficiencia correspondió a CD–lineal–4 h. Las interacciones de material×tiempo, textura×tiempo y la interacción triple no resultaron significativas, evidenciando un comportamiento aditivo del tiempo de retención. En conjunto, los resultados demuestran que la selección del material, la rugosidad superficial y un mayor TRH son determinantes para optimizar el desempeño de sistemas de biodiscos, respaldando su potencial aplicación en esquemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Palabras claves: Aguas residuales de comedor, biodiscos, biopelícula, remoción de DBO₅, tiempo de retención hidráulica.

ABSTRACT

Waste water treatment using rotating biological contactors makes up an efficient alternative for the reduction of the organic charge from domestic effluents. In this context, the efficiency of the removal of the biochemical oxygen demand (BOD; DBO5) from the Universidad Nacional Agraria de la Selva's university cafeteria waste waters using a bio disc system on a laboratory scale was evaluated. The objective was to analyze the effect of the contactor material, the superficial rugosity and the hydraulic retention time (HRT; TRH in Spanish) on the performance of the system. A trifactorial experimental design of $2 \times 2 \times 2$ was applied taking into account two materials (polypropylene and CD), two texture patterns (linear and points) and two retention times (four and eight hours), with twenty four experimental units. The variance analysis revealed that the principal effects from the material, texture and time were highly significant ($p < 0.0001$), with the HRT [being] the factor that was of greatest influence on the removal efficiency. At the same time, a significant interaction was identified between the material and the texture, with the polypropylene-point combination standing out as the most efficient. The greatest BOD removal was obtained with the polypropylene-point-8h combination, with values that were close to 77%, while the least efficiency corresponded to the CD-linear-4h [combination]. The interactions between the material and time, texture and time and the interaction of all three did not result as being significant, revealing an additive behavior for the retention time. Together, the results demonstrated that the selection of the material, superficial rugosity and the greater HRT were determinants for optimizing the performance of the bio disc systems, supporting their potential application in decentralized schematics for domestic water waste treatment.

Keywords: cafeteria waste water, bio discs, biofilm, BOD removal, hydraulic retention time

I. INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de las aguas residuales grises representa un desafío ambiental crítico debido a su elevada carga contaminante. Estas aguas, derivadas de actividades domésticas e institucionales, contienen altas concentraciones de materia orgánica, grasas, aceites y detergentes, lo que incrementa significativamente la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Análisis realizados por Tuesta (2021) reportan valores de DQO de hasta 2266 mg/L, SST de 2000 mg/L; y, aceites y grasas de hasta 240 mg/L, superando ampliamente los Límites Máximos Permisibles (LMP).

El vertimiento de estas aguas sin tratamiento previo genera impactos ambientales significativos, como la disminución del oxígeno disuelto y el aumento de la turbidez, afectando los procesos de autodepuración natural, la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos y representando riesgos para la salud humana (Lao y Del Águila, 2019; Credidio et al., 2018). Ante este escenario, resulta necesario implementar tecnologías de tratamiento eficientes y sostenibles que puedan adaptarse a las características de las aguas residuales generadas en comedores institucionales, donde los volúmenes y la composición de las aguas grises varían ampliamente. Sin embargo, muchas tecnologías convencionales presentan limitaciones relacionadas con altos costos operativos, consumo energético y baja adaptabilidad frente a las características de las aguas residuales grises. Según Tuesta (2021), los sistemas tradicionales no logran atender adecuadamente las elevadas concentraciones de materia orgánica, grasas, aceites y detergentes presentes en este tipo de efluentes; asimismo, Credidio et al. (2018) indican que en muchas instituciones los sistemas de tratamiento resultan insuficientes debido a limitaciones técnicas y operacionales, lo que contribuye al vertimiento de aguas residuales sin cumplir los parámetros de calidad requeridos.

En este contexto, los contactores biológicos rotatorios representan una alternativa eficiente para la remoción de carga orgánica, debido a su bajo consumo energético y capacidad para favorecer el crecimiento de biopelículas microbianas adheridas a discos parcialmente sumergidos. Estas biopelículas permiten la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, contribuyendo a la reducción de parámetros como la DBO_5 . No obstante, la eficiencia de estos sistemas depende de diversos factores estructurales y operacionales. Entre ellos destacan el material del disco y la textura superficial, debido a que influyen en la adherencia y desarrollo de la biopelícula microbiana; asimismo, el tiempo de retención

hidráulica (TRH) determina el tiempo de contacto entre los microorganismos y la materia orgánica presente en el agua residual, afectando directamente la eficiencia del tratamiento.

A pesar de las ventajas de los contactores biológicos rotatorios, aún existen limitadas investigaciones enfocadas en evaluar de manera conjunta el efecto del material del disco, la textura superficial y el tiempo de retención hidráulica sobre la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) en aguas residuales provenientes de comedores institucionales. Esta situación limita la optimización de estos sistemas y restringe su aplicación como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales grises.

La presente investigación adquiere relevancia debido a que busca evaluar el efecto del material del disco, la textura superficial y el tiempo de retención hidráulica en un reactor de biodiscos a escala de laboratorio sobre la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del agua residual del comedor universitario de la UNAS. Asimismo, pretende contribuir al desarrollo de alternativas tecnológicas sostenibles que permitan mejorar la calidad de los efluentes y reducir el impacto ambiental generado por este tipo de descargas.

Por lo expuesto anteriormente, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen las características del contactor biológico rotatorio, en función del material del disco, la textura y el tiempo de retención hidráulica, en la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del agua residual del comedor universitario? A partir de esta interrogante, se formula la siguiente hipótesis: La configuración del contactor biológico rotatorio, en función del material del disco, la textura y el tiempo de retención hidráulica, influye significativamente en la eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del agua residual del comedor universitario.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos a escala de laboratorio en la remoción de carga orgánica del agua residual del comedor UNAS.

1.1.2. Objetivos específicos

Caracterizar la carga orgánica del agua residual del comedor UNAS.

Diseñar un sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.

Determinar el efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos a escala laboratorio en la remoción de carga orgánica del agua residual del comedor UNAS.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Cheng et al. (2025) evaluaron tres tipos de materiales portadores de biopelícula: fieltro convencional, fieltro de carbono y tela no tejida; los resultados indicaron que la tela no tejida presentó el mejor desempeño, alcanzando eficiencias de remoción del 86.76 % para la demanda química de oxígeno (DQO) y del 92.15 % para el nitrógeno amoniacal. Este comportamiento se atribuyó a su mayor rugosidad superficial, alta porosidad y mejor capacidad de adhesión microbiana. El estudio concluyó que las propiedades físicas del material del contactor influyen directamente en la formación de la biopelícula y en la eficiencia global del reactor de biodiscos.

Irfan et al. (2022) analizaron parámetros como la velocidad de rotación de los biodiscos, el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de sólidos, determinando su efecto en la remoción de contaminantes y en la estabilidad del sistema; se evidenciaron eficiencias promedio de remoción de 73.9 % para DQO, 95.6 % para nitrógeno amoniacal y 78.9 % para turbidez, demostrando una elevada capacidad de nitrificación y una respuesta estable frente a variaciones operativas. Asimismo, se observó que velocidades de rotación moderadas favorecieron el desarrollo de la biopelícula, mientras que mayores tiempos de retención incrementaron la actividad microbiana. El estudio concluyó que un control adecuado de los parámetros operativos permite optimizar el rendimiento del reactor manteniendo un bajo consumo energético, posicionando a los biodiscos como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento descentralizado de aguas residuales.

Rodríguez (2021) evaluó el desempeño de reactores biológicos de biodiscos aplicados al tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones, con énfasis en la optimización de los parámetros operativos; los resultados demostraron que el control de variables como la velocidad de rotación influye directamente en la eficiencia del proceso, particularmente en la remoción de materia orgánica y compuestos nitrogenados. La biopelícula adherida a los biodiscos, operando bajo condiciones de inmersión parcial, permitió alcanzar eficiencias de tratamiento entre el 85 % y el 95 %, manteniendo un desempeño estable frente a variaciones operativas. Asimismo, se identificó que una gestión inadecuada de la biomasa puede afectar negativamente el rendimiento del reactor, resaltando la importancia del control operativo y del mantenimiento del sistema. Finalmente, el estudio concluyó que la

implementación de estrategias de control contribuye a optimizar el funcionamiento de los reactores de biodiscos, mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir los costos operativos.

Steinbach (2021) analizó el desempeño de diferentes configuraciones de discos, comparando discos sólidos y discos huecos, con el fin de determinar su influencia en la remoción de nitrógeno; los resultados evidenciaron diferencias significativas en la eficiencia del sistema en función del tipo de disco utilizado. Se observó que los discos sólidos presentaron un mejor desempeño global en los procesos de nitrificación y desnitrificación, alcanzando eficiencias de hasta 97.1 % en nitrificación y 62.1 % en desnitrificación, debido a condiciones más favorables para el desarrollo de la biopelícula. Si bien los discos huecos alcanzaron altos porcentajes de nitrificación en determinados ensayos, el análisis de las cargas totales removidas indicó un mayor rendimiento del sistema con discos sólidos. Finalmente, concluyó que la configuración del material del disco influye directamente en la formación de la biopelícula y, en consecuencia, en la eficiencia de eliminación de nitrógeno.

Waqas et al. (2021) evaluaron el desempeño de un reactor de biodiscos aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones de elevada carga orgánica e hidráulica; el sistema fue operado a escala piloto utilizando un reactor aerobio con discos rotatorios, analizando parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y turbidez. Los resultados evidenciaron eficiencias de remoción del 70.2 % para DQO, 95.2 % para amonio, 70 % para nitrógeno total y 78.9 % para turbidez, sin incrementos significativos en el consumo energético. El estudio concluyó que las características del sistema de biodiscos permiten una alta adaptabilidad frente a variaciones de carga orgánica, lo que lo convierte en una alternativa eficiente y de bajo mantenimiento para el tratamiento descentralizado de aguas residuales.

2.1.2. Nacional

Cáceres (2024) evaluó el desempeño de un sistema de biodiscos aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas con el objetivo de determinar su capacidad de remoción de contaminantes bajo condiciones locales. Los resultados evidenciaron una disminución significativa de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y de la demanda química de oxígeno (DQO), lo que confirma el adecuado desempeño del sistema en la degradación de materia orgánica mediante biopelícula adherida. Asimismo, se observó una reducción de sólidos suspendidos y de coliformes termotolerantes, aunque en algunos casos los valores finales no alcanzaron los límites normativos, situación asociada a las condiciones de operación y a la carga orgánica del afluente. Se concluyó que la eficiencia del sistema de

biodiscos depende directamente del control de los parámetros operativos y del tiempo de contacto entre la biopelícula y el efluente, destacando que un manejo inadecuado puede limitar el cumplimiento normativo.

Ccoicca (2022) analizó la influencia de distintas velocidades de rotación sobre la eficiencia del proceso biológico, considerando parámetros químicos y microbiológicos del efluente tratado. Los resultados evidenciaron que una frecuencia de rotación intermedia (3 RPM) permitió una mejora significativa en la calidad del agua tratada, asociada a una mayor actividad biológica y estabilidad de la biopelícula adherida a los discos. Asimismo, se determinó que, si bien la frecuencia de rotación no generó cambios relevantes en los parámetros físicos del agua, sí influyó directamente en la reducción de la carga química y microbiológica, lo que confirma la importancia del control de las condiciones operativas en sistemas de biodiscos. Concluye que la frecuencia de rotación constituye un factor determinante en la eficiencia del tratamiento, ya que velocidades inadecuadas pueden limitar el rendimiento del sistema.

Lopez (2022) se propuso evaluar la eficiencia de un sistema de biodiscos determinando cómo el tiempo de retención hidráulica influye en la remoción de contaminantes. Los resultados mostraron que, con un tiempo de retención hidráulica de 4 h, la eficiencia de remoción de DBO_5 fue de alrededor del 40 % y de DQO un 50 %, mientras que con un tiempo de 8 h la eficiencia aumentó hasta aproximadamente 80 % para ambos parámetros. Asimismo, se observó una mayor eliminación de coliformes totales y *Escherichia coli* con 8 h de retención (96,25 % y 97,11 %, respectivamente). Se concluyó que aumentar el tiempo de retención hidráulica mejora significativamente la eficiencia del tratamiento con biodiscos.

Delgado (2019) evaluó el desempeño de un sistema de biodiscos diseñado a escala de laboratorio como tratamiento secundario de aguas residuales provenientes de un reactor UASB. El análisis consideró la respuesta del sistema frente a variaciones en la velocidad de rotación de los discos, midiendo parámetros clave como demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos totales (SST), turbidez y pH del efluente. Los resultados demostraron que el reactor de biodiscos presentó reducciones significativas de la DBO_5 y de otras fracciones de la carga contaminante, evidenciando que parámetros operativos como la velocidad de rotación influyen directamente en la eficiencia de depuración. Finalmente, concluyó que los biodiscos constituyen una alternativa eficaz para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas, especialmente cuando se ajustan adecuadamente las variables operativas que afectan la interacción entre la biopelícula y el afluente.

2.1.3. Local

Raymundo (2025) tuvo como finalidad determinar las características del efluente de aguas grises generadas en la cocina del comedor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva; el estudio identificó que estas aguas grises no contaban con un tratamiento previo y que se incorporaban directamente al colector principal, por lo que se realizó el muestreo y análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, DQO, turbidez, sólidos totales suspendidos y aceites y grasas) y microbiológicos en dos puntos de monitoreo durante los meses de junio, julio y agosto. Los resultados mostraron que la demanda química de oxígeno, los sólidos totales suspendidos y los aceites y grasas no cumplían con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, mientras que coliformes termotolerantes no fueron detectados.

Céliz (2019) evaluó la eficiencia de un reactor de biodiscos en la remoción de carga orgánica bajo diferentes tiempos de retención hidráulica; el reactor experimental estuvo conformado por 48 discos de poliestireno, distribuidos en cuatro etapas y operando a una velocidad de rotación aproximada de 0.18 m/s, empleando aguas residuales con alta carga orgánica. Se analizaron parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). Los resultados mostraron eficiencias de remoción de carga orgánica de 65.90 %, 73.01 % y 80.18 % para tiempos de retención hidráulica de 2, 4 y 8 horas, respectivamente, evidenciando que un mayor tiempo de contacto entre el efluente y la biopelícula mejora la degradación de la materia orgánica. Asimismo, condiciones de pH cercano a la neutralidad favorecieron el desarrollo estable de la biopelícula y optimizaron los procesos de oxidación biológica, concluyéndose que los reactores de biodiscos son una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales con elevada carga orgánica.

2.2. Biodiscos

Los biodiscos son sistemas de tratamiento de aguas residuales que emplean un proceso biológico mediante la formación de biopelículas adheridas a discos rotativos sumergidos parcialmente en el agua residual. Estos discos giran lentamente, alternando entre la inmersión en el agua y la exposición al aire, lo que facilita el contacto entre los microorganismos de la biopelícula y los nutrientes presentes en el agua residual, así como el oxígeno necesario para sus procesos metabólicos. Este mecanismo permite la degradación eficiente de la materia orgánica y otros contaminantes, al combinar la actividad aeróbica y anaeróbica de los microorganismos (Metcalf & Eddy, 2003).

El diseño de biodiscos ofrece ventajas significativas, como su bajo consumo energético, facilidad de operación y mantenimiento, y alta eficiencia en la eliminación de carga orgánica en comparación con otros sistemas convencionales. Además, son particularmente útiles para el tratamiento de aguas residuales con fluctuaciones de caudal y carga orgánica, debido a su capacidad de adaptación a diferentes condiciones operativas (Tchobanoglous et al., 2014).

La efectividad de los biodiscos depende de varios factores, incluyendo la velocidad de rotación de los discos, la cantidad de área superficial disponible para el desarrollo de biopelículas y la composición del material del que están hechos. Estos factores influyen directamente en la capacidad del sistema para remover materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fósforo (Rusten et al., 1995).

2.3. Biopelículas en tratamiento de aguas

Las biopelículas son comunidades microbianas adheridas a una superficie sólida, rodeadas por una matriz extracelular que ellas mismas producen. En el contexto del tratamiento de aguas residuales, las biopelículas desempeñan un papel fundamental al ser responsables de la degradación de materia orgánica y otros contaminantes a través de procesos metabólicos específicos. Su estructura heterogénea permite la coexistencia de microorganismos con diferentes capacidades metabólicas, promoviendo procesos aeróbicos, anaeróbicos y anóxicos simultáneamente (Flemming & Wingender, 2010).

La formación de una biopelícula se da en varias etapas: primero, los microorganismos se adhieren a la superficie del material del soporte; luego, se multiplican y generan una matriz que los protege y los mantiene adheridos, permitiendo la formación de una comunidad estable. Esta característica es aprovechada en sistemas de tratamiento de aguas como biodiscos, lechos percoladores y reactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR), donde las biopelículas trabajan como filtros vivos que degradan y eliminan los contaminantes del agua residual (Nicolella et al., 2000).

La eficiencia de las biopelículas en el tratamiento de aguas depende de factores como la disponibilidad de nutrientes, la concentración de oxígeno, el tiempo de residencia hidráulico y las características del material del soporte. Un diseño adecuado puede maximizar el contacto entre la biopelícula y el agua residual, optimizando la remoción de materia orgánica, compuestos nitrogenados y fósforo (Lewandowski & Beyenal, 2014).

2.4. Norma OS.090

Los sistemas biológicos rotativos de contacto, también conocidos como contactores biológicos, son unidades diseñadas con un medio de contacto dispuesto en discos o módulos cilíndricos que giran sobre su eje. Este medio de contacto está parcialmente sumergido, generalmente hasta el 40% de su diámetro. Gracias a este movimiento de rotación, se asegura que la biopelícula alternadamente entre en contacto con el efluente primario y el aire, promoviendo el tratamiento biológico. Este proceso presenta características de eficiencia similares a las de los filtros biológicos (Norma OS.090, 2009).

Antes de implementar estos sistemas, es fundamental realizar un tratamiento previo que incluya cribas, desarenadores y un sedimentador primario. Esto asegura que los efluentes ingresen en condiciones adecuadas al sistema de contacto (Norma OS.090, 2009).

Los módulos rotatorios pueden contar con diversos medios de contacto, como discos fabricados en madera, plástico o metal, dispuestos en paralelo para maximizar la superficie disponible para el desarrollo de la biopelícula. Otra opción son las mallas cilíndricas rellenas con materiales livianos que también facilitan el crecimiento biológico (Norma OS.090, 2009).

Para diseñar adecuadamente estas unidades, se deben observar ciertas recomendaciones técnicas:

- La carga hidráulica debe situarse entre 0.03 y 0.16 m³/m²/día.
- La velocidad periférica de rotación, en el caso de tratar aguas residuales municipales, debería mantenerse alrededor de 0.3 m/s.
- El volumen mínimo de las unidades debe corresponder a 4.88 litros por cada metro cuadrado de superficie del medio de contacto.
- Se recomienda el uso de al menos cuatro unidades en serie para optimizar el proceso (Norma OS.090, 2009).

El efluente que sale de estos sistemas debe pasar por un sedimentador secundario con el objetivo de separar la biomasa desprendida del reactor biológico. Los parámetros de diseño para esta unidad son equivalentes a los utilizados en los sedimentadores secundarios de filtros biológicos (Norma OS.090, 2009).

2.5. Material de biodiscos

El material de los biodiscos desempeña un papel crucial en la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que influye directamente en la formación, adherencia y actividad de las biopelículas. Investigaciones han demostrado que la rugosidad de

la superficie del material afecta significativamente la capacidad de los microorganismos para adherirse y formar comunidades estables. Por ejemplo, un estudio realizado con tiras de polietileno mostró que las superficies rugosas lograron una mayor remoción de DBO y SST en comparación con las lisas. Esto se debe a que las superficies con mayor rugosidad ofrecen un área de contacto más amplia y microentornos que facilitan el desarrollo de biopelículas activas, mejorando así la eficiencia del tratamiento (Esmail & El-Saify, 2019).

Además, las modificaciones químicas de los materiales de soporte, como los biocarriers de polietileno, han mostrado resultados prometedores. Al aumentar la rugosidad de la superficie mediante procesos de oxidación química o recubrimientos específicos, se logró incrementar la formación de biopelículas en un 60% y mejorar la eficiencia de eliminación de DQO en un 10%. Estos resultados indican que, además de la rugosidad, los grupos funcionales y las propiedades hidrofílicas de la superficie también juegan un papel importante al facilitar la adherencia de microorganismos y su actividad metabólica (Chen et al., 2012).

Otro aspecto relevante es la composición del material de los biodiscos. En un estudio experimental que comparó materiales como vidrio, arena y carbón activado, se encontró que este último permitió la mayor formación de biomasa adherida debido a su estructura porosa y su capacidad para retener nutrientes y microorganismos. Esto refuerza la idea de que la selección adecuada del material de los biodiscos puede optimizar el rendimiento del sistema al proporcionar mejores condiciones para el desarrollo de biopelículas (Apilánez et al., 1998).

Por otro lado, los estudios teóricos y experimentales sobre la interacción entre la rugosidad de la superficie y la adhesión bacteriana también destacan la importancia de las microasperezas. Estas características reducen las barreras fisicoquímicas para la adhesión inicial de los microorganismos, promoviendo así la formación de biopelículas más rápidamente. Modelos computacionales y experimentos de laboratorio han confirmado que el diseño de superficies con rugosidad controlada puede mejorar la eficiencia del tratamiento en sistemas de biodiscos (Ammar et al., 2015).

De esta manera, se demuestran que el material y las propiedades físicas de los biodiscos son determinantes para la eficacia del tratamiento biológico de aguas residuales. La combinación de materiales con rugosidad optimizada y modificaciones químicas puede potenciar significativamente la capacidad de los biodiscos para reducir contaminantes, haciendo de estas estrategias un campo de estudio crucial para el desarrollo de tecnologías de tratamiento más eficientes.

a. Discos de policarbonato (CD)

Zhou et al. (2021) expresa que los discos compactos (CD) están fabricados principalmente de policarbonato (PC), un polímero termoplástico de ingeniería caracterizado por su elevada resistencia mecánica, estabilidad dimensional y baja reactividad química en ambientes acuosos. Estas propiedades permiten su uso como soporte físico en sistemas experimentales de biodiscos, especialmente a escala laboratorio, donde se requiere un material rígido, uniforme y fácilmente manipulable.

Asimismo, el policarbonato ha sido evaluado comparativamente con otros plásticos en sistemas de película fija, mostrando un comportamiento adecuado para la colonización microbiana bajo condiciones controladas (Flemming & Wingender, 2010).

El empleo de CD's comerciales en desuso, compuestos mayoritariamente por policarbonato, constituye una alternativa viable para estudios experimentales comparativos, ya que permite disponer de superficies geométricamente uniformes y químicamente estables. Su utilización en investigaciones a escala laboratorio no persigue una aplicación normativa o industrial directa, sino un enfoque experimental, orientado a evaluar el efecto del material del disco sobre la formación de biopelícula y la eficiencia de remoción de carga orgánica, en comparación con materiales de referencia ampliamente utilizados.

b. Discos de polipropileno

El polipropileno es uno de los materiales plásticos más empleados en la fabricación de biodiscos y otros soportes para biopelículas en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales, debido a su baja densidad, elevada resistencia química y durabilidad en ambientes acuosos. Estas características lo convierten en un material ampliamente utilizado tanto en aplicaciones experimentales como en sistemas a escala industrial (Chen et al., 2012).

Estudios previos han reportado que el polipropileno presenta un comportamiento favorable para la adhesión y el crecimiento de biopelículas, particularmente cuando su superficie presenta cierto grado de rugosidad, lo que incrementa el área efectiva de contacto y facilita la retención de microorganismos. Por estas razones, el polipropileno es considerado un material de referencia en la evaluación comparativa de nuevos o alternativos materiales de soporte en reactores biológicos de película fija (Zhou et al., 2021).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se realizó utilizando agua residual proveniente del comedor universitario, los análisis de las muestras y la instalación del sistema experimental de biodiscos a escala laboratorio se llevaron a cabo en el Laboratorio de Calidad de Suelos, perteneciente a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio

Departamento: Huánuco

Provincia : Leoncio Prado

Distrito : Rupa Rupa



Figura 1. Mapa de ubicación del lugar de ejecución.

3.1.2. Clima

El clima de la ciudad de Tingo María es de tipo tropical, según lo indica el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2022). Este se encuentra dentro de la región conocida como Selva Alta o Rupa Rupa, según la clasificación de Javier Pulgar Vidal en su tesis "Las ocho regiones naturales del Perú" (1940). Esta región, ubicada en el flanco oriental de la Cordillera Andina entre los 400 y 1,000 msnm, debe su nombre a la expresión quechua "Rupa Rupa", que significa "ardiente" o "caliente", en alusión a las características climáticas de la zona. La temperatura promedio anual es de 27.8 °C, con

máximos de hasta 32.9 °C y mínimos de 18.6 °C, mientras que la humedad relativa promedio alcanza el 87.9 % (SENAMHI, 2022). Pulgar (2014) también señala que las temperaturas suelen oscilar entre los 22 °C y 25 °C, con máximas superiores a 36 °C e inferiores a 33 °C, y mínimas que varían entre los 15 °C y los 19 °C. En cuanto a la precipitación, esta alcanza un promedio anual de 3,450.60 mm, destacándose por su intensidad constante, ya que no existe un mes en el que no llueva. Sin embargo, las precipitaciones disminuyen entre junio y octubre y son más abundantes entre noviembre y mayo, como lo describe Pulgar Vidal en su análisis del régimen climático de la región (Pulgar, 2014; SENAMHI, 2022).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Los materiales utilizados incluyeron discos de contacto fabricados en policarbonato reciclado proveniente de discos compactos (CD) y polipropileno, ambos con un diámetro real de 9.16 cm. Los discos fueron acondicionados previamente y presentaron superficies con distintos niveles de rugosidad, obtenidos mediante modificación manual controlada. Asimismo, se emplearon recipientes de vidrio estériles con una capacidad de 1 L para la recolección de muestras de agua residual; tubos y válvulas destinados al control del flujo hidráulico del reactor; así como etiquetas resistentes al agua para la adecuada identificación de las muestras.

3.2.2. Equipos

Los equipos empleados consistieron en un sistema de biodiscos a escala de laboratorio de una sola etapa, con discos parcialmente sumergidos hasta el 40 % de su diámetro y operados a una velocidad de rotación constante de aprox. 63 rpm, lo que corresponde a una velocidad periférica del orden de 0.3 m/s, en concordancia con los lineamientos de la Norma OS.090; una bomba peristáltica; una sonda multiparamétrica para la medición de pH; un turbidímetro para la determinación de la turbiedad; una balanza analítica; cronómetros para el control de los tiempos de operación; guantes, mascarillas y bata de laboratorio como equipos de protección personal y una laptop para el procesamiento de la información.

3.2.3. Insumos

Los insumos empleados comprendieron de detergente; agua destilada; clavos metálicos y una fuente de calor utilizados para la generación de hendiduras en los discos de contacto; un cooler portátil para la preservación de las muestras a una temperatura aproximada de 4 °C; instrumentos auxiliares de medición como cintas métricas y reglas

graduadas; y muestras de agua residual utilizadas como insumo del proceso biológico, las cuales fueron recolectadas y conservadas bajo condiciones de refrigeración.

3.2.4. Software

El software utilizado incluyó ArcGIS para el procesamiento y análisis espacial de la información; Microsoft Word para la redacción del documento; Microsoft Excel para la organización y tabulación de datos; y R Studio para el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

3.3. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que tuvo como objetivo contribuir a la solución de un problema práctico, específicamente la gestión de las descargas de aguas residuales generadas en el comedor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Este tipo de estudio se orientó a utilizar el conocimiento científico y técnico para abordar una necesidad concreta, desarrollando soluciones susceptibles de ser implementadas en un contexto real. En este caso, la implementación de biodiscos con diferentes configuraciones buscó optimizar la remoción de carga orgánica del agua residual, proponiendo una alternativa eficiente y sostenible que respondió a las características específicas de esta fuente de contaminación. La naturaleza aplicada de la investigación aseguró que los resultados obtenidos fueran relevantes no solo desde un punto de vista teórico, sino también práctico, facilitando su transferencia a escenarios similares donde se enfrentaron desafíos en el tratamiento de aguas residuales.

3.3.1. Nivel de investigación

La investigación fue de nivel explicativo, ya que tuvo como propósito principal determinar los efectos de la configuración del contactor biológico rotatorio sobre la eficiencia de remoción de la carga orgánica presente en el agua residual del comedor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Este enfoque permitió establecer relaciones causales entre las variables de estudio mediante la evaluación experimental del material del disco, la textura superficial y el tiempo de retención hidráulica (TRH) sobre el desempeño del sistema de tratamiento.

Asimismo, el estudio permitió analizar cómo las características del contactor influyeron en la adherencia y desarrollo de la biopelícula microbiana, afectando la eficiencia de remoción de carga orgánica, expresada mediante la DBO_5 . La naturaleza explicativa de la investigación contribuyó a generar conocimientos aplicables para la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante contactores biológicos rotatorios en contextos institucionales.

3.3.2. Variables en estudio

a. Variable dependiente

- Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

b. Variable independiente

Características del contactor biológico rotatorio:

- Material del disco.
- Textura superficial.
- Tiempo de retención hidráulica.

3.3.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue de tipo experimental, dado que se manipularon deliberadamente factores estructurales y operacionales del sistema de contactores biológicos rotatorios con el objetivo de evaluar su efecto sobre la remoción de carga orgánica, expresada como DBO₅, del agua residual.

Se empleó un diseño factorial completo 2×2×2, considerando tres factores: material del contactor (CD y polipropileno), textura superficial (lineal y puntos) y tiempo de retención hidráulica (TRH = 4 h y TRH = 8 h). Este enfoque permitió evaluar los efectos principales de cada factor y sus interacciones entre ellos sobre la eficiencia de remoción de DBO₅. En total, la combinación de estos factores dio lugar a 8 tratamientos experimentales, y cada tratamiento se evaluó mediante 3 corridas temporales independientes en el mismo reactor, obteniéndose un total de 24 observaciones experimentales (n = 24), donde cada corrida constituyó la unidad experimental.

3.3.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) trifactorial, que permitió evaluar los efectos principales de los tres factores considerados (material del contactor, textura superficial y tiempo de retención hidráulica), así como sus interacciones, sobre la eficiencia de remoción de DBO₅. Este enfoque resultó adecuado para determinar si las diferencias observadas entre tratamientos fueron estadísticamente significativas.

Se adoptó un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. En el ANOVA se analizaron de manera independiente los efectos de material, textura y TRH, y los efectos de interacción (Material×Textura, Material×TRH, Textura×TRH y Material×Textura×TRH), con el fin de identificar si la combinación de factores produjo un efecto adicional al de cada factor por separado.

Para la interpretación de los resultados y la comparación de promedios, se aplicó una prueba post hoc de Tukey cuando el ANOVA indicó diferencias significativas, permitiendo identificar cuáles niveles y combinaciones de niveles diferían entre sí con un criterio estadístico consistente.

El procesamiento y análisis de los datos se desarrolló en R Studio, registrando para cada corrida experimental la DBO₅ del influente y del efluente y calculando el porcentaje de remoción, que constituyó la variable dependiente del estudio.

Finalmente, se verificaron los supuestos del ANOVA, tales como la normalidad y la homogeneidad de varianzas, aplicando pruebas como Shapiro-Wilk y Levene. Cuando fue necesario, se consideró el uso de transformaciones de datos o alternativas no paramétricas para garantizar la robustez del análisis y de las conclusiones.

3.4. Metodología

3.4.1. Caracterización de la carga orgánica del agua residual del comedor UNAS

Con el fin de establecer una línea base representativa de la carga orgánica del agua residual generada en el comedor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), se realizó una caracterización fisicoquímica del afluente. Se aplicó un muestreo compuesto durante cinco días consecutivos, comprendidos entre el 25 y el 29 de agosto del año 2025, para capturar la variabilidad diaria asociada a la preparación de alimentos, lavado de utensilios y actividades de limpieza.

El punto de muestreo correspondió al buzón de desagüe del comedor universitario, por considerarse representativo del efluente generado. Las muestras se recolectaron en recipientes de vidrio limpios y estériles de 1 L, rotulados de forma inmediata con el código de muestra. Durante el proceso se mantuvo una cadena de custodia para asegurar la trazabilidad y confiabilidad de la información.



Figura 2. Recolección de muestra de agua residual en el buzón de desagüe del comedor universitario.

Una vez recolectadas, las muestras fueron preservadas y transportadas en un cooler portátil a una temperatura aproximada de 4 °C, con la finalidad de minimizar alteraciones por actividad biológica antes del análisis en laboratorio.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Suelos, empleándose métodos estandarizados y equipos calibrados para evaluar DBO₅, turbiedad, pH y sólidos disueltos totales (TDS). En la Tabla 1 se presentan los indicadores evaluados y el método analítico aplicado para cada uno de ellos.

Tabla 1. Indicadores fisicoquímicos y métodos analíticos aplicados.

Indicadores	Método analítico aplicado
DBO ₅	DBO ₅ = (OD inicial – OD final)
Turbiedad	Turbidímetro
pH	Método potenciométrico
Sólidos disueltos totales	Método N° 2540 APHA (1999)

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de la DBO₅ se utilizó el método de incubación de 5 días, estimando la demanda bioquímica a partir de la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y final (DBO₅ = OD inicial - OD final). Cuando fue necesario, se realizaron diluciones

para asegurar lecturas válidas de consumo de oxígeno. Las botellas se incubaron en oscuridad bajo condiciones controladas, siguiendo el procedimiento estándar adoptado en el estudio.

La turbiedad se midió con turbidímetro, el pH mediante método potenciométrico y los TDS siguiendo el método 2540 de APHA, registrándose los valores por día de muestreo. Todos los resultados se consignaron en una hoja de campo y una matriz digital para su posterior análisis y discusión.

Los resultados obtenidos se registraron identificando cada muestra según el día de recolección. Posteriormente, se calcularon los valores promedio de los parámetros analizados, lo que permitió realizar una caracterización representativa de la carga orgánica del agua residual del comedor universitario y evaluar su calidad en función de los valores observados.

3.4.2. Diseño de un sistema de contactores biológicos a escala laboratorio

El diseño del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio se desarrolló tomando como referencia criterios técnicos de operación de biodiscos (RBC) y los lineamientos de la Norma OS.090. El sistema se configuró con un tanque tipo media caña construido a partir de un tubo PVC de 4", dentro del cual se instaló un eje rotatorio con discos parcialmente sumergidos, manteniendo una inmersión aproximada del 40 % del diámetro para alternar exposición al aire y contacto con el agua residual.

El volumen operativo del reactor se determinó a partir de la geometría del canal y la longitud útil del sistema, obteniéndose un volumen de trabajo de 3.24 L. Este valor fue seleccionado para permitir el control de caudales pequeños con bomba peristáltica y reducir la variabilidad hidráulica durante los ensayos, especialmente al comparar tiempos de retención hidráulica (TRH).

Para el rotor se definió un paquete de 44 discos, estableciendo diámetro y separación constantes para asegurar condiciones comparables entre tratamientos. El área superficial total disponible para el crecimiento de biopelícula se calculó considerando ambas caras de cada disco, resultando un área total instalada de 0.5799 m², parámetro crítico porque la remoción de carga orgánica depende de la superficie efectiva de soporte microbiano.

La velocidad de rotación se fijó a partir de la velocidad periférica recomendada para RBC, de modo que se garantice la transferencia de oxígeno y el desprendimiento controlado del biofilm. Dado el diámetro reducido de los discos a escala laboratorio, se adoptó una rotación aproximada de 63 RPM, equivalente a una velocidad periférica técnicamente aceptable, manteniéndose constante en todas las corridas

experimentales para evitar confusión entre los efectos de los factores evaluados y variaciones en oxigenación o esfuerzo de corte.

Para la operación en régimen continuo se establecieron dos tiempos de retención hidráulica (TRH): 4 h y 8 h. El caudal de trabajo se calculó mediante balance hidráulico ($Q = V/TRH$) y se expresó en mL/min para calibrar la bomba peristáltica. Con un volumen operativo de 3.24 L, el caudal se ajustó aproximadamente a 13.5 mL/min para TRH = 4 h y 6.8 mL/min para TRH = 8 h, verificando cada ajuste mediante medición volumétrica-tiempo.

Adicionalmente, se verificó que la operación se mantuviera dentro de rangos técnicamente aceptables en términos de carga hidráulica superficial y relación volumen/área. Estas verificaciones permitieron asegurar que las condiciones hidráulicas y mecánicas del reactor fueran estables y replicables, de manera que el desempeño observado se atribuya a los factores del diseño experimental.

3.4.3. Efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos en la remoción de carga orgánica

Para evaluar el efecto de las características del contactor en la remoción de carga orgánica, se definió como variable de respuesta la eficiencia de remoción de DBO₅ (%), calculada a partir de mediciones pareadas de DBO₅ en el influente y en el efluente del reactor para cada corrida experimental, mediante la relación: $\% \text{ Remoción} = [(DBO5_{in} - DBO5_{out}) / DBO5_{in}] \times 100$. Esta variable resume el desempeño del sistema y permite comparar tratamientos bajo un mismo criterio.

Previo al inicio de las corridas experimentales, el reactor de biodiscos fue sometido a un proceso de arranque biológico orientado a la colonización y aclimatación de la biopelícula sobre la superficie de los discos. Este proceso se desarrolló durante un período aproximado de una semana, empleando el propio agua residual del comedor universitario como fuente natural de inóculo microbiano, sin adición externa de cultivos, con el fin de favorecer el establecimiento de una comunidad microbiana representativa del agua residual tratada. Durante esta etapa, el sistema se operó de manera continua, permitiendo la adhesión progresiva y el desarrollo del biofilm sobre los discos, hasta alcanzar un comportamiento funcional estable del reactor. El criterio adoptado para considerar el sistema en estado estable fue de tipo operativo–funcional, basado en la observación de un desempeño consistente del sistema, evidenciado por valores de remoción de DBO₅ sin fluctuaciones marcadas entre mediciones consecutivas bajo condiciones constantes de operación.

Solo una vez verificada esta condición de estabilidad funcional, se dio inicio a las corridas experimentales, las cuales se organizaron mediante un diseño factorial completo $2 \times 2 \times 2$, con tres factores: (i) material del disco (CD y polipropileno), (ii) textura superficial (lineal y puntos) y (iii) tiempo de retención hidráulica (TRH = 4 h y TRH = 8 h). La combinación de niveles generó 8 tratamientos y se realizaron 3 réplicas por tratamiento ($n = 24$), manteniendo constantes las demás condiciones del reactor (número de discos, área instalada y velocidad de rotación).

Los discos de ambos materiales se acondicionaron para trabajar con el mismo diámetro efectivo de 9.16 cm y se limpiaron previamente para retirar polvo y grasas que pudieran interferir con la adhesión inicial del biofilm. La textura superficial se generó manualmente usando clavos calientes, aplicando dos patrones estandarizados: una textura tipo lineal (hendiduras en trazos paralelos) y una textura tipo puntos (marcas puntuales distribuidas uniformemente). En ambos casos se mantuvo un patrón homogéneo por disco para asegurar comparabilidad entre réplicas.

El sistema se operó en régimen continuo y se alimentó con el agua residual del comedor previamente caracterizada. El TRH se controló mediante la calibración del caudal en la bomba peristáltica, utilizando los valores de diseño correspondientes a 4 h y 8 h. La velocidad de rotación del eje se mantuvo constante (≈ 63 RPM) durante todo el experimento, de manera que los cambios en eficiencia se atribuyan a los factores evaluados y no a variaciones en oxigenación o cizallamiento del biofilm.

Para cada tratamiento se verificó primero la configuración (material y textura instalados) y el TRH objetivo. Luego, el sistema se dejó operar hasta estabilizar las condiciones operativas del reactor antes de la toma de muestras, evitando registrar estados transitorios inmediatamente después de un ajuste de caudal o reemplazo de discos. La secuencia de ensayos se condujo procurando alternar tratamientos para reducir sesgos por variaciones diarias del influente.

En cada réplica se recolectaron muestras del influente y del efluente en recipientes estériles, rotulados y preservados en refrigeración (≈ 4 °C) hasta su análisis. La DBO_5 se determinó siguiendo el procedimiento de incubación de 5 días y el cálculo por diferencia de oxígeno disuelto inicial y final. Con estos valores se calculó el porcentaje de remoción y se registró junto con el tratamiento correspondiente.

Los datos obtenidos se organizaron en una matriz de registro que incluyó: material, textura, TRH, DBO₅ influente, DBO₅ efluente y % de remoción, permitiendo comparaciones directas entre tratamientos y el posterior análisis estadístico.

El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA trifactorial (Material $\times$ Textura $\times$ TRH), con nivel de significancia $p \leq 0.05$. Cuando se identificaron diferencias significativas se aplicó la prueba de Tukey para comparación de medias. Asimismo, se verificaron supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante pruebas estadísticas (Shapiro-Wilk y Levene) para garantizar la validez del modelo.

Tabla 2. Diseño experimental factorial (2 $\times$ 2 $\times$ 2) y esquema de recolección de datos.

Material del disco	Textura superficial	TRH (h)	Parámetro a medir
CD	Lineal	4	DBO ₅
	Puntos		
Polipropileno	Lineal		
	Puntos		
CD	Lineal	8	
	Puntos		
Polipropileno	Lineal		
	Puntos		

Fuente: Elaboración propia.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización de la carga orgánica del agua residual del comedor UNAS

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual del comedor.

ID Muestra	Parámetros evaluados			
	DBO ₅ (mg/L)	Turbiedad (NTU)	pH	TDS (mg/L)
Muestra 1	260.824	111.500	7.184	669.856
Muestra 2	334.381	129.979	7.360	676.045
Muestra 3	323.699	119.815	6.909	637.627
Muestra 4	293.115	153.797	7.340	627.483
Muestra 5	279.219	132.046	7.056	667.182
Promedio	298.248	129.427	7.170	655.639

Fuente: Elaboración propia.

La caracterización fisicoquímica del efluente del comedor (Tabla 3) evidencia un efluente con carga orgánica biodegradable moderadamente alta y presencia significativa de sólidos, condiciones típicas de aguas residuales provenientes de actividades de preparación de alimentos, lavado de utensilios y limpieza de áreas de cocina. En promedio, se obtuvo $\text{DBO}_5 = 298.25 \pm 30.59$ mg/L, turbiedad = 129.43 ± 15.93 NTU, $\text{pH} = 7.17 \pm 0.19$ y $\text{TDS} = 655.64 \pm 21.62$ mg/L, mostrando variabilidad diaria esperable por cambios en menú, caudal y rutinas de limpieza. Este patrón concuerda con la descripción teórica de que efluentes con fracción orgánica fácilmente biodegradable son compatibles con tratamientos biológicos aerobios de biopelícula, como biodiscos (Metcalf & Eddy, 2003; Tchobanoglous et al., 2014).

Respecto a la DBO_5 , los valores oscilaron entre 260.824 y 334.381 mg/L (rango = 73.557 mg/L), confirmando una presencia significativa de materia orgánica asociada a restos de comida, aceites y compuestos solubles provenientes de cocina y lavado. El valor máximo (Muestra 2: 334.381 mg/L) sugiere un día con mayor aporte de sustrato biodegradable, mientras que el mínimo (Muestra 1: 260.824 mg/L) refleja un aporte menor o mayor dilución. Al comparar con efluentes de alta carga como camales, se observa una diferencia marcada: Ballarte (2024) reporta alrededor de 1750 mg/L de DBO_5 , lo que es aproximadamente 5.9 veces el promedio medido en el comedor; esta discrepancia es coherente porque los camales descargan sangre y proteínas en alta concentración, mientras que el comedor aporta principalmente residuos alimentarios y detergentes. Así, la magnitud de DBO_5 encontrada sigue justificando tratamiento, pero con una “fuerza” orgánica menor que efluentes industriales pecuarios.

En turbiedad, los valores estuvieron entre 111.500 y 153.797 NTU, con un pico en la Muestra 4 (153.797 NTU), lo que indica alta presencia de partículas finas (sólidos

orgánicos, emulsiones de grasas y residuos de lavado). Es importante notar que turbiedad y DBO_5 no aumentaron de forma estrictamente paralela (por ejemplo, la Muestra 4 tuvo turbiedad máxima, pero DBO_5 intermedia: 293.115 mg/L), lo cual sugiere mezcla variable de sólidos suspendidos versus materia orgánica disuelta. Esta condición respalda la necesidad de pretratamiento (cribado/sedimentación) antes de biodiscos, en concordancia con la Norma OS.090 (2009), que recomienda unidades previas para evitar sobrecarga y desprendimiento excesivo de biopelícula por sólidos gruesos. En términos prácticos, la turbiedad observada justifica técnicamente que la remoción de sólidos sea parte crítica del tren de tratamiento antes del reactor biológico rotatorio.

El pH se mantuvo en un rango cercano a neutralidad (6.909 – 7.360), con promedio 7.17, condición favorable para el crecimiento microbiano y la estabilidad de biopelículas aerobias. Este comportamiento es consistente con lo observado por Céliz (2019), quien reporta que condiciones de pH cercano a neutro favorecen el desarrollo estable de biopelícula y mejoran la oxidación biológica en biodiscos; por tanto, el efluente del comedor presenta una “ventaja operativa” porque no requeriría corrección química intensa de pH antes del tratamiento. Además, al mantenerse el pH en un rango estable entre muestras (variación total ≈ 0.45 unidades), se reduce el riesgo de choques de operación sobre la biomasa, aspecto relevante en sistemas de biopelícula donde el equilibrio microbiano sostiene la eficiencia del proceso (Metcalf & Eddy, 2003).

En relación con los sólidos disueltos totales (TDS), se obtuvieron valores entre 627.483 y 676.045 mg/L, con el máximo en la Muestra 2 (676.045 mg/L) y el mínimo en la Muestra 4 (627.483 mg/L). Esta diferencia (≈ 48.56 mg/L) sugiere variación en el aporte de sales y compuestos disueltos, atribuible a detergentes, desinfectantes y solutos provenientes de procesos de limpieza. Un punto relevante es que la Muestra 4 combinó turbiedad alta con TDS bajo, lo que sugiere predominio de fracción suspendida (residuos finos) más que disuelta; en cambio, la Muestra 2 mostró simultáneamente DBO_5 alta (334.381 mg/L) y TDS alto (676.045 mg/L), compatible con mayor carga orgánica soluble y presencia de químicos de lavado. En términos de tratabilidad, estos TDS se asocian más a variabilidad de operación que a inhibición directa, pero sí son un indicador útil para entender cambios en conductividad y presencia de surfactantes que pueden modificar la formación/adherencia de biopelícula en los discos.

A partir del análisis realizado, la caracterización confirma que el efluente del comedor presenta carga orgánica relevante ($\text{DBO}_5 \approx 298$ mg/L) y sólidos/partículas considerables (turbiedad ≈ 129 NTU), con pH adecuado para tratamiento biológico. Esto

sustenta la necesidad de implementar tratamiento previo y un proceso biológico eficiente, ya que la descarga sin tratamiento puede contribuir a disminución del oxígeno disuelto, incremento de turbidez y afectación de procesos de autodepuración en cuerpos receptores (Lao y Del Águila, 2019), además de riesgos sanitarios por contaminación asociada a efluentes doméstico-alimentarios (Credidio et al., 2018). Por lo tanto, los resultados de Tabla 3 no solo describen la “calidad inicial” del agua residual, sino que también justifican técnicamente la selección de biodiscos como alternativa de depuración para este tipo de descarga.

4.2. Diseño de un sistema de contactores biológicos a escala laboratorio

El sistema RBC (biodiscos) se diseñó para operar a escala laboratorio con un tanque tipo media caña construido a partir de un tubo PVC de 4" y una longitud útil $L = 0.80 \text{ m}$, con el objetivo de garantizar una geometría simple, reproducible y compatible con la observación y control del biofilm. El volumen operativo del canal se determinó a partir del área transversal del semicírculo del tubo y la longitud del reactor, empleando:

$$A = \frac{\pi R^2}{2}; V = A \cdot L; V_{(L)} = \frac{V_{(cm^3)}}{1000}$$

donde $R = \frac{D}{2}$. Con $D = 4 \text{ in} \cdot 2.54 = 10.16 \text{ cm}$, se obtuvo un volumen operativo de $V = 3.24L$, valor que permite trabajar con caudales pequeños y controlables mediante bomba peristáltica, reduciendo variabilidad hidráulica en ensayos de TRH.

Para el rotor se definió un paquete de 44 discos de espesor $e = 3 \text{ mm}$ y separación libre (gap) $g = 15 \text{ mm}$, de modo que el paso o pitch entre discos sea:

$$Pitch = e + g$$

y el número de discos se estime por:

$$N = \left\lfloor \frac{L}{Pitch} \right\rfloor$$

Con $L = 80 \text{ cm}$ y $Pitch = 18 \text{ mm} = 1.8 \text{ cm}$, resultó $N = 44$, consistente con la ficha de taller. El diámetro de disco se ajustó el diámetro interno del tubo dejando un margen de holgura, resultando $D_d = 9.16 \text{ cm}$ ($r = 4.58 \text{ cm}$). El área superficial total disponible para biopelícula se calculó considerando dos caras por disco:

$$A_1 = 2\pi r^2; A_T = N \cdot A_1$$

obteniéndose $A_T = 0.5799 \text{ m}^2$. Este parámetro es crítico en biodiscos, porque la remoción de carga orgánica depende de la superficie de soporte para biopelícula y del equilibrio entre crecimiento y desprendimiento (Metcalf & Eddy, 2003).

La velocidad de rotación se definió a partir de la velocidad periférica recomendada para RBC en condiciones municipales, $v_p \approx 0.3 \text{ m/s}$ (Norma OS.090). A partir de la cinemática del movimiento circular:

$$v_p = \omega r \rightarrow \omega = \frac{v_p}{r}; RPM = \frac{\omega 60}{2\pi}$$

con $r = 0.0458 \text{ m}$, se estimó una rotación de $\approx 63 \text{ RPM}$, valor que permite alternar inmersión-exposición, favoreciendo transferencia de oxígeno al biofilm y actividad metabólica aerobia. Esta decisión es coherente con el principio del RBC, donde el biofilm se oxigena por exposición al aire y se alimenta por contacto con el efluente (Metcalf & Eddy, 2003; Norma OS.090, 2009).

Para la operación en régimen continuo se fijaron dos tiempos de retención hidráulica (TRH): 4h y 8h. El caudal teórico se obtuvo por balance hidráulico:

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

expresándolo en mL/min:

$$Q_{(mL/min)} = \frac{Q_{(L/h)} \cdot 1000}{60}$$

Con $V = 3.24 \text{ L}$, se calcularon $Q = 13.5 \text{ mL/min}$ para 4h y $Q = 6.8 \text{ mL/min}$ para 8h, que son los valores usados para calibrar la bomba peristáltica.

Además, se estimó la carga hidráulica superficial (en la lógica de OS.090) como:

$$CS = \frac{Q_d}{A_T}; \quad \text{donde} \quad Q_d = Q_{(m^3/d)}$$

y $Q_{(m^3/d)} = \frac{Q_{(L/h)} \cdot 24}{1000}$. Con ello se obtuvo $CS = 0.0336 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ para 4h (clasificado como óptimo, dentro de 0.03 – 0.16) y $CS = 0.0168 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ para 8h (clasificado como baja carga). Esta diferencia es importante: el TRH alto reduce el caudal y la carga aplicada por área, favoreciendo estabilidad de biopelícula, pero también cambia el “régimen” operativo hacia condiciones de baja carga, lo cual es útil experimentalmente para contrastar desempeño y coherente con evidencia de que TRH mayores suelen incrementar la eficiencia de remoción (Lopez, 2022; Céliz, 2019).

Finalmente, el dimensionamiento también cumple el criterio volumétrico mínimo recomendado por OS.090:

$$\frac{V}{A_T} \geq 4.88 \text{ L/m}^2$$

En este diseño, $\frac{V}{A_T} = \frac{3.24}{0.5799} = 5.59 \text{ L/m}^2$, por encima del mínimo normativo, lo que respalda que el volumen no es insuficiente respecto al área instalada. En síntesis, el diseño (volumen 3.24 L, área 0.5799 m², 63 RPM, caudales 13.5 y 6.8 mL/min) establece un marco hidráulico-mecánico consistente para evaluar, con control experimental, el efecto del material y la rugosidad del contactor sobre la remoción de carga orgánica.

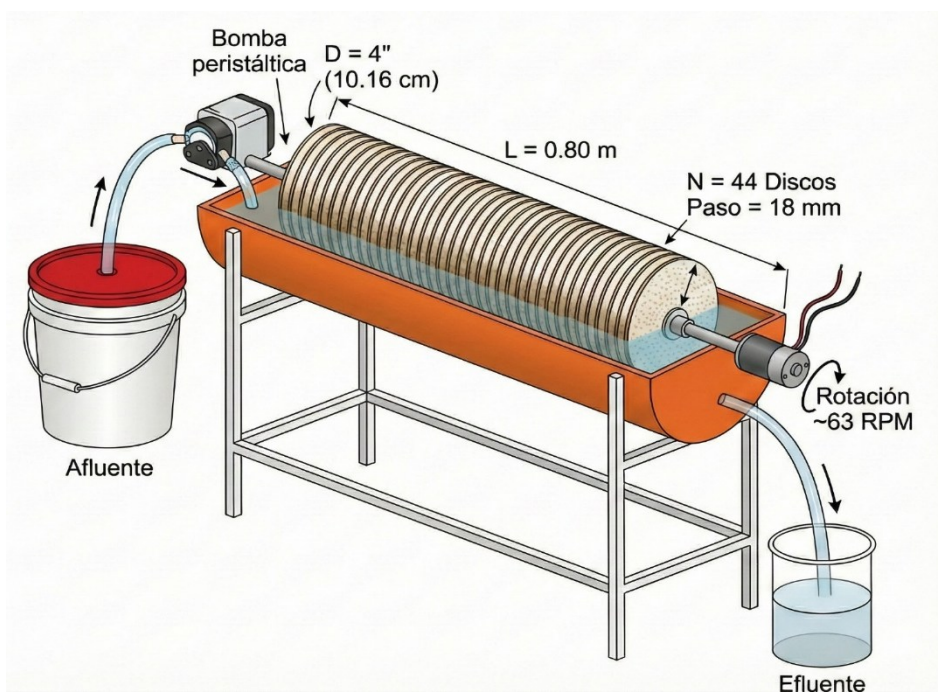


Figura 3. Diseño y dimensiones del sistema de contactores biológicos rotatorios (RBC) a escala laboratorio.

4.3. Efecto de las características del contactor en un reactor de biodiscos en la remoción de carga orgánica

El ANOVA trifactorial (Material $\times$ Textura $\times$ Tiempo; $n = 24$) mostró que el modelo fue altamente significativo ($p < 0.0001$) y explicó prácticamente toda la variación de la eficiencia de remoción de DBO₅ ($R^2 = 0.98$; CV = 3.82%). En los efectos principales, Material, Textura y Tiempo resultaron significativos ($p < 0.0001$), mientras que, a nivel de interacciones, solo Material $\times$ Textura fue significativa ($p = 0.0047$); las interacciones con Tiempo y la interacción triple no fueron significativas ($p > 0.05$). Esto indica que la eficiencia depende fuertemente del TRH, y además existe un “efecto combinado” entre el tipo de material y el patrón de rugosidad aplicado.

Tabla 4. Análisis de varianza trifactorial del rendimiento del reactor RBC bajo diferentes condiciones de operación.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3258.96	7	465.57	96.2	<0.0001
Material	449.07	1	449.07	92.79	<0.0001
Textura	642.76	1	642.76	132.81	<0.0001
Tiempo	2100.91	1	2100.91	434.1	<0.0001
Material*Textura	52.26	1	52.26	10.8	0.0047
Material*Tiempo	0.05	1	0.05	0.01	0.9206
Textura*Tiempo	6.18	1	6.18	1.28	0.275
Material*Textura*Tiempo	7.73	1	7.73	1.6	0.2244
Error	77.43	16	4.84		
Total	3336.39	23			

Fuente: Elaboración propia.

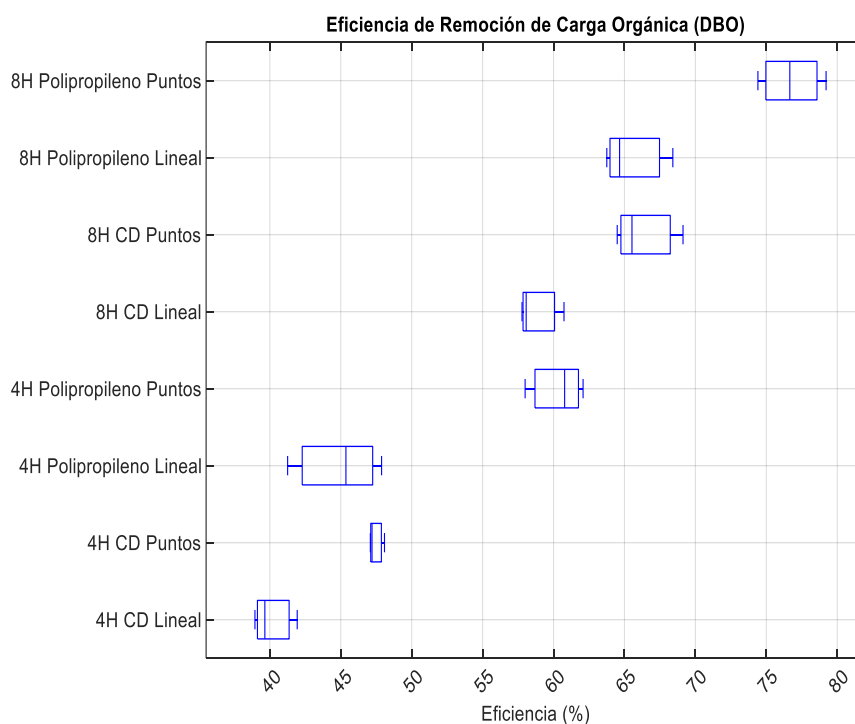


Figura 4. Distribución de la eficiencia de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos bajo diferentes combinaciones de material, textura superficial y tiempo de retención hidráulica.

4.3.1. Efecto del material del contactor biológico

El material del contactor influyó significativamente en la remoción de DBO ($p < 0.0001$). En promedio, el soporte de polipropileno alcanzó 61.87% (Tukey: grupo B), mientras que el soporte tipo CD logró 53.22% (Tukey: grupo A), es decir, una diferencia de 8.65 puntos porcentuales. Esta separación supera ampliamente la DMS de Tukey para efectos principales (1.90), confirmando que el material condiciona la eficiencia por su influencia en la

adhesión y estabilidad de la biopelícula, y en el contacto sustrato–microorganismo durante la rotación.

Estos resultados son coherentes con la teoría de biodiscos: la eficiencia depende del área efectiva y de las propiedades del medio soporte que favorecen el crecimiento de biopelícula (Metcalf & Eddy, 2003; Tchobanoglous et al., 2014). También concuerda con Rodríguez (2021), quien reporta que la superficie efectiva del contactor mejora la adherencia microbiana y, por ende, la remoción de carga orgánica. Sin embargo, difiere parcialmente de Steinbach (2021), quien encontró ventajas de discos sólidos frente a discos huecos para nitrificación/desnitrificación; la discrepancia es esperable porque su estudio evaluó procesos nitrogenados y condiciones de baja carga orgánica, mientras que aquí el indicador es DBO₅ (materia orgánica biodegradable) y el desempeño puede responder de forma distinta al tipo de sustrato y a la configuración superficial del soporte.

Tabla 5. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO₅ según el material del contactor.

Material	Medias	n	E.E.	
CD	53.22	12	0.64	A
Polipropileno	61.87	12	0.64	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

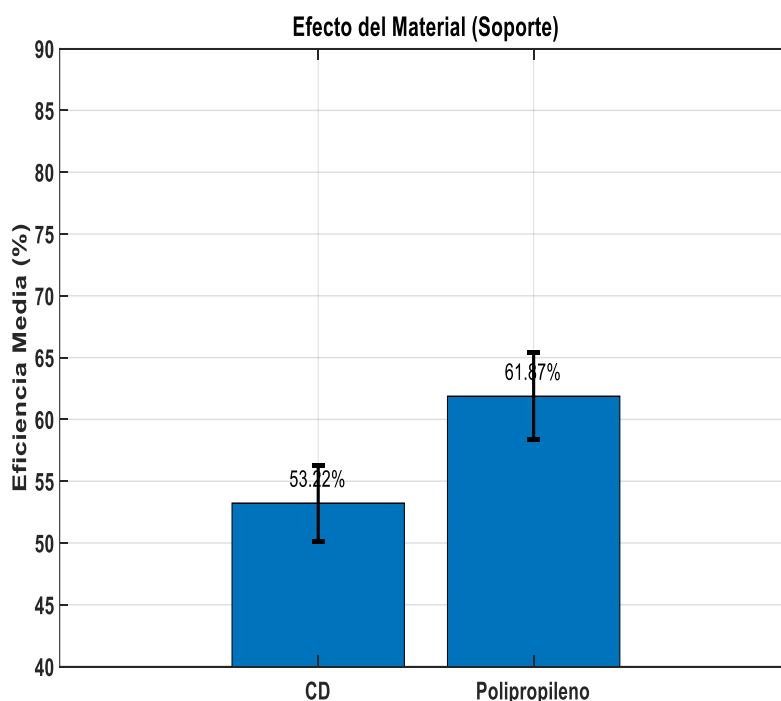


Figura 5. Efecto del material del contactor biológico en la eficiencia promedio de remoción de DBO₅ (%) del reactor de biodiscos.

4.3.2. Efecto de la rugosidad

La rugosidad superficial del contactor (Textura) fue un factor determinante en la eficiencia de remoción de DBO_5 ($p < 0.0001$). La textura tipo Puntos alcanzó una eficiencia promedio de 62.72% (Tukey: B) y la textura Lineal 52.37% (Tukey: A), con una ganancia de 10.35 puntos porcentuales a favor de “Puntos”. En términos prácticos, el patrón de puntos incrementa micro-asperezas y microrefugios que facilitan la adhesión inicial y la retención de biomasa, elevando la fracción de biopelícula activa y el contacto efectivo con el sustrato orgánico.

Esta tendencia concuerda directamente con lo reportado por Cheng et al. (2025), quienes observaron que superficies más rugosas mejoran la remoción (por mayor área y anclaje microbiano). De manera similar, Irfan et al. (2022) y Chen et al. (2012) señalan que las características físicas del medio soporte influyen significativamente en el desempeño biológico del RBC, ya que las superficies más favorables permiten un desarrollo más estable de la biopelícula y una respuesta más eficiente ante variaciones de carga orgánica.

Asimismo, Ammar et al. (2015) sostienen que la rugosidad reduce barreras para la adhesión inicial, acelerando el establecimiento de biopelícula. En el marco de biopelículas, esto es consistente con Flemming y Wingender (2010), porque una matriz extracelular más estable sobre superficies “irregulares” tiende a resistir mejores esfuerzos de corte y a sostener comunidades microbianas más densas.

Tabla 6. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO_5 según la textura superficial del contactor.

Textura	Medias	n	E.E.	
Lineal	52.37	12	0.64	A
Puntos	62.72	12	0.64	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

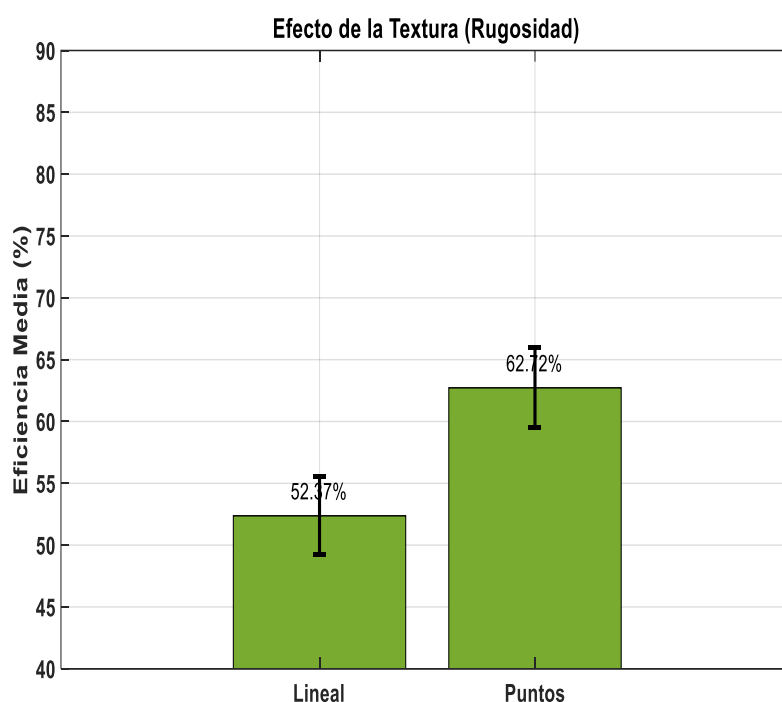


Figura 6. Efecto de la rugosidad superficial en la eficiencia promedio de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos.

4.3.3. Efecto de los tiempos de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue el factor con mayor peso estadístico dentro del diseño experimental ($p < 0.0001$) y presentó la mayor diferencia entre promedios de eficiencia. Con un TRH de 4 h se obtuvo una eficiencia media de remoción de 48.19% (Tukey: A); mientras que, con 8 h, se incrementó a 66.90% (Tukey: B), es decir, un incremento de 18.71 puntos porcentuales. Este salto sugiere que, a 4 h, parte de la fracción biodegradable no alcanza a difundirse y degradarse completamente en la biopelícula, mientras que a 8 h aumenta el tiempo de contacto y la probabilidad de oxidación biológica, mejorando la remoción.

La dirección del efecto coincide claramente con antecedentes nacionales y locales. Según Lopez (2022), al pasar de 4 h a 8 h la eficiencia de remoción de DBO y DQO se incrementó (reportando 40 – 50% a 4 h y hasta ~80% a 8 h), lo cual es consistente con el patrón observado aquí (48.19% → 66.90%). También concuerda con Céliz (2019), quien reportó mayor eficiencia a mayor TRH (por ejemplo, mejoras sostenidas hasta 8 h). La diferencia en magnitud respecto a estudios que alcanzan ~80% puede explicarse por la naturaleza del afluente (aguas del comedor con grasas/detergentes y alta variabilidad), el grado de pretratamiento, el estado de madurez de biopelícula y condiciones operativas que afectan

transferencia de oxígeno y desprendimiento de biomasa (Metcalf & Eddy, 2003; Tchobanoglous et al., 2014).

Tabla 7. Prueba de comparación múltiple (Tukey) de la eficiencia de remoción de DBO_5 según el tiempo de retención hidráulica.

Tiempo	Medias	n	E.E.	
4H	48.19	12	0.64	A
8H	66.9	12	0.64	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

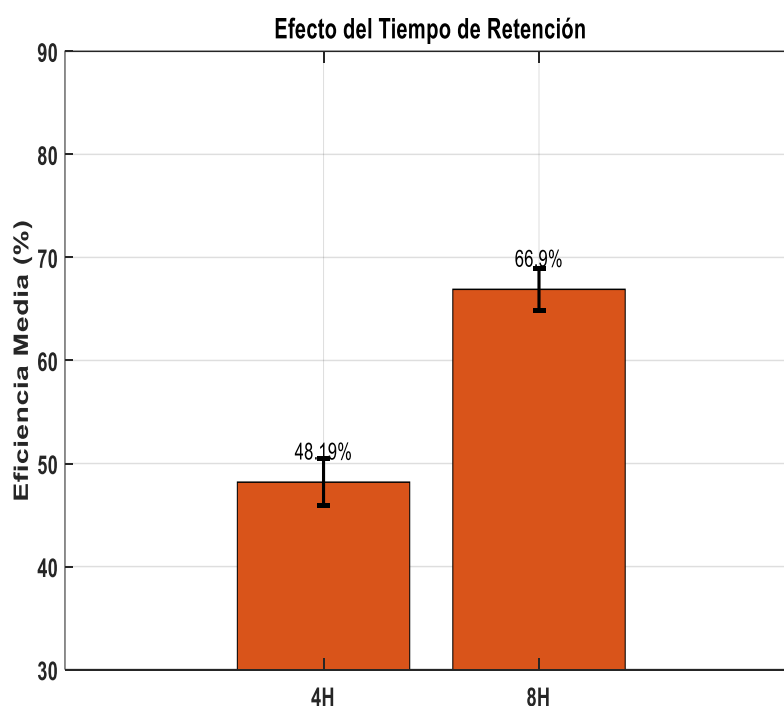


Figura 7. Influencia del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia promedio de remoción de DBO_5 (%) del reactor de biodiscos.

4.3.4. Efecto de las interacciones

La interacción Material×Textura fue significativa ($p = 0.0047$), lo que significa que el impacto de la rugosidad no fue igual para ambos materiales. Como se observa en la Tabla 8, con Tukey ($\text{DMS} = 3.63$), la combinación Polipropileno–Puntos logró 68.52% (grupo C), significativamente superior a Polipropileno–Lineal (55.22%, grupo B) y a CD–Lineal (49.52%, grupo A). En cambio, CD–Puntos (56.92%, grupo B) quedó estadísticamente al nivel de Polipropileno–Lineal, lo que evidencia una sinergia más marcada cuando la textura “Puntos” se aplica sobre polipropileno (ganancia aproximada de 13.30 puntos al pasar de

Lineal→Puntos) que cuando se aplica sobre CD (ganancia ~7.40 puntos). Este comportamiento sugiere una sinergia entre el material y la rugosidad superficial, donde el polipropileno presenta mejores condiciones para aprovechar la rugosidad inducida. Este resultado es coherente con Cheng et al. (2025), quienes atribuyen mejoras de rendimiento a materiales con mayor rugosidad/porosidad efectiva y mejor adhesión microbiana; aquí, el polipropileno parece “aprovechar” mejor la rugosidad inducida.

Tabla 8. Efecto conjunto del material y la textura del contactor en la eficiencia de remoción de DBO_5 .

Material	Textura	Medias	n	E.E.	
CD	Lineal	49.52	6	0.9	A
Polipropileno	Lineal	55.22	6	0.9	B
CD	Puntos	56.92	6	0.9	B
Polipropileno	Puntos	68.52	6	0.9	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la interacción Material×Tiempo ($p = 0.9206$) no fue significativa, lo que indica que el beneficio de aumentar el TRH de 4 h a 8 h fue consistente entre materiales y texturas (efecto principalmente aditivo). Tal como se muestra en los promedios de la Tabla 9, el material tipo CD subió de 43.82% (4 h) a 62.62% (8 h) (+18.80), mientras que el polipropileno pasó de 52.56% a 71.18% (+18.62), evidenciando incrementos prácticamente paralelos

Tabla 9. Efecto del material del contactor y del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO_5 .

Material	Tiempo	Medias	n	E.E.	
CD	4H	43.82	6	0.9	A
Polipropileno	4H	52.56	6	0.9	B
CD	8H	62.62	6	0.9	C
Polipropileno	8H	71.18	6	0.9	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, la interacción Textura×Tiempo ($p = 0.2750$) tampoco resultó significativa. Según los resultados presentados en la Tabla 10, tanto la textura lineal como la textura tipo puntos mostraron incrementos comparables en la eficiencia de remoción

al pasar de 4 h a 8 h de TRH, lo que indica que el beneficio asociado al aumento de tiempo de retención es esencialmente aditivo e independiente del patrón de rugosidad del contactor.

Tabla 10. Efecto de la textura del contactor y del tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO₅.

Textura	Tiempo	Medias	n	E.E.			
Lineal	4H	42.51	6	0.9	A		
Puntos	4H	53.87	6	0.9		B	
Lineal	8H	62.23	6	0.9			C
Puntos	8H	71.57	6	0.9			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

Aunque la interacción triple no fue significativa ($p = 0.2244$), el Tukey por combinación muestra con claridad el “techo” del sistema. Como se aprecia en la Tabla 11, la combinación Polipropileno–Puntos–8 h alcanzó 76.76% (grupo E), significativamente mayor que todas las demás combinaciones; y el mínimo fue CD–Lineal–4 h con 40.18% (grupo A). Este patrón refuerza que el diseño óptimo combina material favorable + rugosidad favorable + mayor TRH, alineado con la lógica de funcionamiento de biodiscos y el rol de biopelícula descrito por Flemming y Wingender (2010) y por Lewandowski y Beyenal (2014).

Tabla 11. Efecto combinado del material, la textura y el tiempo de retención hidráulica en la eficiencia de remoción de DBO₅.

Material	Textura	Tiempo	Medias	n	E.E.				
CD	Lineal	4H	40.18	3	1.27	A			
Polipropileno	Lineal	4H	44.84	3	1.27	A	B		
CD	Puntos	4H	47.46	3	1.27		B		
CD	Lineal	8H	58.86	3	1.27			C	
Polipropileno	Puntos	4H	60.29	3	1.27			C	D
Polipropileno	Lineal	8H	65.61	3	1.27				D
CD	Puntos	8H	66.38	3	1.27				D
Polipropileno	Puntos	8H	76.76	3	1.27				E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

El sistema de contactores biológicos rotatorios a escala laboratorio permitió evaluar de manera eficiente la remoción de carga orgánica (DBO_5) del agua residual del comedor de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, demostrando que el material y la rugosidad del contactor, así como el tiempo de retención hidráulica, influyen significativamente en el desempeño del proceso biológico.

La caracterización fisicoquímica del agua residual del comedor evidenció una carga orgánica biodegradable moderadamente alta, con valores de DBO_5 , turbiedad y sólidos disueltos totales propios de efluentes doméstico-alimentarios y un pH cercano a la neutralidad, condiciones que resultan favorables para la aplicación de tratamientos biológicos aerobios como los biodiscos.

El sistema de biodiscos diseñado cumplió con los criterios hidráulicos y operativos recomendados, presentando un volumen, área superficial, velocidad de rotación y tiempos de retención hidráulica adecuados, lo que permitió una operación estable y reproducible para la evaluación experimental de la remoción de DBO_5 .

La evaluación experimental demostró que el material del contactor, la rugosidad superficial y el tiempo de retención hidráulica influyen significativamente en la eficiencia de remoción de DBO_5 , destacando el mejor desempeño del polipropileno con textura tipo puntos y un tiempo de retención de 8 h, así como la existencia de una interacción significativa entre el material y la textura del contactor.

VI. PROPUESTA A FUTURO

El sistema de contactores biológicos rotatorios evaluado a escala laboratorio ha demostrado un comportamiento consistente en la remoción de carga orgánica. En ese sentido, se plantea como una línea futura la adaptación del sistema a escalas piloto o semipiloto, con el propósito de analizar su desempeño bajo mayores caudales y condiciones operativas más cercanas a escenarios reales, manteniendo los principios de diseño validados en el presente estudio.

Si bien en esta investigación se analizaron materiales y patrones de rugosidad específicos, futuros estudios podrían considerar otras variantes de materiales o configuraciones superficiales, a fin de comparar su desempeño bajo condiciones operativas similares y ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de la biopelícula en sistemas de biodiscos.

El enfoque del presente trabajo se centró en la eficiencia de remoción de DBO_5 como indicador de carga orgánica biodegradable. No obstante, investigaciones posteriores podrían incorporar parámetros adicionales, tales como demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos o indicadores microbiológicos, con el objetivo de realizar evaluaciones más integrales de la calidad del efluente tratado.

Asimismo, el comportamiento del sistema bajo los tiempos de retención hidráulica evaluados permitió identificar tendencias claras de eficiencia. En ese contexto, podría considerarse la evaluación del sistema durante periodos de operación más prolongados, orientados al análisis de la estabilidad de la biopelícula, el consumo energético y la respuesta del sistema frente a variaciones operativas normales.

Finalmente, a partir del desempeño observado a escala laboratorio, sería viable evaluar la aplicación del sistema de contactores biológicos rotatorios en esquemas de tratamiento descentralizado, tales como comedores institucionales, centros educativos u otras instalaciones con características similares de generación de aguas residuales domésticas, contribuyendo a la mejora de la gestión ambiental y al fortalecimiento de prácticas de saneamiento sostenible.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apilánuez, I., Gutiérrez, A., & Díaz, M. (1998). Effect of Surface materials on initial biofilm development. *Bioresource Technology*, 66(3), 225-230. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00052-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00052-2)

Ammar, Y., Swailes, D., Bridgens, B., & Chen, J. (2015). Influence of surface roughness on the initial formation of biofilm. *Surface & Coatings Technology*, 284, 410-416. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.062>

Ballarte, A. (2024). *Tratamiento de efluentes líquidos del camal municipal para mitigar contaminación del río Huallaga, Huánuco, 2023* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. Repositorio Institucional UNHEVAL. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/9904>

Cáceres, G. (2024). *Eficiencia de un sistema de biodiscos en la reducción de características microbiológicas y fisicoquímicas de las aguas residuales del distrito de Ayaviri 2023* [Tesis de grado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Repositorio Institucional UANCV. <https://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2148>

Ccoicca, J. (2022). *Efectos de la frecuencia de rotación de un sistema de biodiscos en la calidad del tratamiento de aguas grises* [Tesis de grado, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio Institucional UPLA. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/4934>

Céliz, E. (2019). *Efecto del tiempo de retención hidráulica en un reactor de biodiscos a escala de laboratorio, en la depuración de efluentes del matadero municipal de Tingo María – Huánuco* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1554>

Chen, S., Cheng, X., Zhang, X., & Sun, D. (2012). Influence of surface modification of polyethylene biocarriers on biofilm properties and wastewater treatment efficiency in moving-bed biofilm reactors. *Water Science and Technology*, 65(6), 1021-1026. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.915>

Cheng, H. et al. (2025). Treatment Performance and Characteristics of Biofilm Carriers in an Aerobic Waterwheel-Driven Rotating Biological Contactor. *Water*, 17(3), 356. <https://doi.org/10.3390/w17030356>

Credidio, A., De Gracia, D., García, E., Villarreal, D., & Vallester, E. (2018). Análisis de la descarga de aguas grises por la Cafetería del Edificio N. ° 1 de la Universidad Tecnológica de Panamá. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 14-18. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1861>

Delgado, G. (2019). Estudio de biodiscos como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas. *Revista TECNIA*, 29(1), 12-18. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v29i1.545>

Esmail, E., & El-Saify, M. (2019). Effect of Polyethylene strips surface roughness on its efficiency for enhancement of wastewater treatment. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(2), 3514-3519. <https://doi.org/10.35940/ijitee.b6266.129219>

Flemming, H., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623-633. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>

Irfan, M. et al. (2022). Effect of Operating Parameters and Energy Expenditure on the Biological Performance of Rotating Biological Contactor for Wastewater Treatment. *Energies*, 15(10), 3523. <https://doi.org/10.3390/en15103523>

Lao, H. y Del Águila, L. (2019). *Determinación de la eficiencia entre los métodos de electrocoagulación y coagulación química para la remoción de la turbiedad del agua residual doméstica – Tarapoto, 2019* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/41563>

Lewandowski, Z., & Beyenal, H. (2014). *Fundamentals of biofilm research* (2nd ed.). CRC Press.

Lopez, S. (2022). *Tratamiento de aguas residuales municipales aplicando un Sistema de Biodiscos a condiciones controladas en el distrito de Lampa, 2022* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Digital Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/92194>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma OS.090: Plantas de tratamiento de aguas residuales*. Reglamento Nacional de Edificaciones. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686395/OS.090%20Plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20DS%20n%C2%B0%20022-2009.pdf?v=1641411306>

Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.

Nicolella, C., van Loosdrecht, M., & Heijnen, J. (2000). Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. *Journal of Biotechnology*, 80(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(00\)00229-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(00)00229-7)

Pulgar, J. (2014). *Geografía del Perú. Las ocho regiones naturales* (12th ed.). INTE-PUCP.

Raymundo, Y. (2025). *Evaluación de las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas grises de la cocina del comedor de la UNAS – Tingo María* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/3171>

Rodríguez, J. (2021). *Diseño de un sistema inteligente para el control de un reactor biológico de aguas residuales empleando biodiscos* [Tesis de grado, Universidade da Coruña]. Repositorio Universidade Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/30463>

Rusten, B., Hem, L., & Ødegaard, H. (1995). Nitrogen removal from dilute wastewater in cold climate using moving-bed biofilm reactors. *Water Environment Research*, 67(1), 65-74. <https://doi.org/10.2175/106143095X131204>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2022). *CLIMAS DEL PERÚ – Mapa de Clasificación Climática Nacional*. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01404SENA-4.pdf>

Steinbach, J. (2021). *Evaluación de la eficiencia de desnitrificación de un sistema de discos biológicos rotativos (biodiscos) en el tratamiento de efluentes urbanos* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Comahue]. Repositorio Digital Institucional UNCO. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/16907>

Tchobanoglous, G., Stensel, H., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Tuesta, J. (2021). *Diseño de un proceso físico para la reducción de contaminantes generados por aguas residuales de los usuarios no domésticos en la ciudad de Moyobamba* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional UNSM. <http://hdl.handle.net/11458/4189>

Waqas, S., Bilad, M., & Man, Z. (2021). Performance and Energy Consumption Evaluation of Rotating Biological Contactor for Domestic Wastewater Treatment. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 6(1), 101-112. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i1.31524>

Zhou, Y., Kiely, P., Kibbee, R., & Ormeci, B. (2021). Effect of polymeric support material on biofilm development, bacterial population, and wastewater treatment performance in anaerobic fixed-film systems. *Chemosphere*, 264(1), 128477. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128477>

VIII. ANEXOS

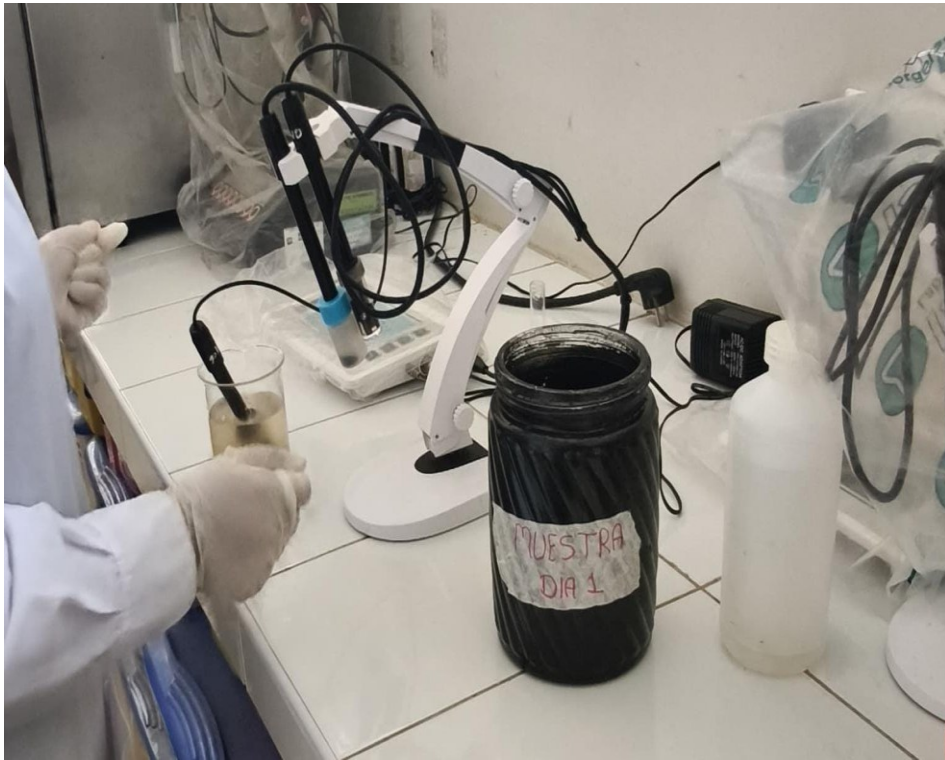


Figura 8. Análisis de parámetros fisicoquímicos en laboratorio.



Figura 9. Construcción del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.



Figura 10. Configuración inicial del paquete de 44 discos sobre el eje horizontal rotatorio.



Figura 11. Acondicionamiento del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.



Figura 12. Funcionamiento del sistema de contactores biológicos a escala laboratorio.



Figura 13. Desarrollo de biopelícula en contactor biológico rotatorio (RBC).