

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

Remoción de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB mediante el proceso UV/H₂O₂

Para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario.

Elaborado por

Alec Andre Perales Martinez

 [0009-0007-2352-9571](https://orcid.org/0009-0007-2352-9571)

Asesor

Dra. Rosa Elena Yaya Beas

 [0000-0002-6140-4266](https://orcid.org/0000-0002-6140-4266)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Perales Martinez [1]
Referencia/Reference	[1] A. Perales Martinez, " <i>Remoción de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB mediante el proceso UV/H₂O₂</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Perales, 2025)
Referencia/Reference	Perales, A. (2025). <i>Remoción de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB mediante el proceso UV/H₂O₂</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mi familia, en especial a mis padres, mi hermanita y mis abuelas, por su amor,
apoyo incondicional y fe en mí.*

Agradecimientos

A la Dra. Rosa Elena Yaya Beas, por su tiempo, paciencia y orientación brindada durante el desarrollo de esta investigación.

A la familia de CITRAR-FIA-UNI por todas las facilidades y apoyo brindados durante toda la investigación, en especial al Ing. Miguel Quiroz, Leslie Centeno, Manuel Romero y Ramsés Huamán.

Al personal del Laboratorio de Investigación del Agua (LIA) por su guía y colaboración durante el desarrollo de los análisis de la investigación, en especial a la Srta. Jimena, la Sra. Margarita, la Sra. Lita y el Sr. Raúl.

Al Ing. Jorge Tello y el Ing. Christian Ayala, por sus valiosos consejos para la adecuada realización del análisis principal de esta investigación.

A mis compañeros tesisistas, por el apoyo mutuo, el compañerismo y el esfuerzo compartido.

A mis padres, mi hermana y mis abuelas por su contaste respaldo a lo largo de este proceso.

Resumen

Esta investigación evaluó la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB mediante la aplicación del proceso UV/H₂O₂ con y sin filtración previa. Se empleó un reactor fotoquímico con lámparas UV suspendidas (Irradiancia: 4.13 mW/cm²) y un filtro de arena de lecho reducido (Tasa aproximada: 7.29 m³/m²/día).

Se estudió dos configuraciones de tratamiento, la primera aplicando el proceso UV/H₂O₂ sobre el efluente del reactor UASB con dosis de H₂O₂ de 112, 170 y 300 mg/l y tiempos de contacto UV de 10, 20, 30 y 60 segundos, mientras que la segunda configuración consistió en filtrar las muestras a través del filtro, para luego aplicar el proceso UV/H₂O₂ con las dosis de H₂O₂ de 10, 30 y 50 mg/l durante los mismos tiempos de contacto UV.

La configuración N°01 alcanzó eficiencias entre el 85.80% y 99.83%, logrando una remoción promedio de 2.95 unidades logarítmicas con 112 mg/l de H₂O₂ y una dosis UV de 60.03 mWs/cm².

En cambio, la configuración N°02 mostró eficiencias entre el 99.391% y 99.992%, logrando 4.20 unidades logarítmicas de remoción con solo 10 mg/l de H₂O₂ y una dosis UV de 189.15 mW/cm².

Los resultados demostraron que el proceso de filtración previo mejora la eficiencia del proceso UV/H₂O₂, permitiendo alcanzar mayores remociones de coliformes termotolerantes con menores dosis de peróxido, cumpliendo la normativa nacional.

Palabras clave: Peróxido de hidrógeno, dosis UV, procesos de oxidación avanzada, coliformes termotolerantes.

Abstract

This research evaluated the removal efficiency of thermotolerant coliforms from the effluent of a UASB reactor through the application of the UV/H₂O₂ process, with and without prior filtration. A photochemical reactor equipped with suspended UV lamps (Irradiance: 4.13 mW/cm²) and a compact sand bed filter (Approximate filtration rate: 7.29 m³/m²/day) was used.

Two treatment configurations were studied. The first involved applying the UV/H₂O₂ process directly to the UASB effluent, using H₂O₂ doses of 112, 170, and 300 mg/L and UV contact times of 10, 20, 30, and 60 seconds. The second configuration consisted of filtering the samples through the sand filter prior to applying the UV/H₂O₂ process, with H₂O₂ doses of 10, 30, and 50 mg/L under the same UV contact times.

Configuration No. 1 achieved removal efficiencies ranging from 85.80% to 99.83%, with an average log reduction of 2.95 using 112 mg/L of H₂O₂ and a UV dose of 60.03 mW/cm². In contrast, Configuration No. 2 exhibited efficiencies between 99.391% and 99.992%, reaching a 4.20-log reduction with only 10 mg/L of H₂O₂ and a UV dose of 189.15 mW/cm². The results demonstrated that the prior filtration process enhances the efficiency of the UV/H₂O₂ treatment, enabling higher thermotolerant coliform removal with lower hydrogen peroxide doses, in compliance with national regulations.

Keywords — Hydrogen peroxide, UV dose, advanced oxidation processes, thermotolerant coliforms.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción	xvii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.3 Justificación e importancia	1
1.4 Objetivos del estudio.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos	2
1.5 Hipótesis	3
1.6 Antecedentes investigativos	3
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	5
2.1 Marco teórico	5
2.1.1 Características biológicas de las aguas residuales	5
2.1.2 Coliformes termotolerantes	5
2.1.3 Reactores UASB	5
2.1.4 Desinfección en aguas residuales	6
2.1.5 Desinfección ultravioleta	6
2.1.6 Intensidad de radiación UV	7
2.1.7 Dosis de radiación UV	8
2.1.8 Tiempo de exposición UV	8
2.1.9 Factores que influyen en la desinfección UV	9
2.1.10 Procesos de oxidación avanzada	9
2.1.10.1 Proceso UV/H ₂ O ₂	10
2.2 Marco conceptual.....	11

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	12
3.1 Ubicación de la investigación.....	12
3.2 Afluente del sistema de tratamiento.....	12
3.3 Descripción de la metodología.....	12
3.4 Reactor fotoquímico	14
3.5 Filtro de arena	16
3.5.1 Selección del medio filtrante	19
3.5.1.1 Análisis granulométrico del medio filtrante.....	20
3.5.1.2 Porosidad del medio filtrante.....	20
3.5.2 Selección del medio de soporte	21
3.5.2.1 Análisis granulométrico del medio de soporte	22
3.5.2.2 Porosidad del medio de soporte	22
3.6 Mantenimiento del sistema	23
3.7 Puntos de monitoreo	23
3.8 Parámetros evaluados	24
3.9 Frecuencia de monitoreo	25
3.10 Periodos de investigación	25
3.11 Materiales, insumos y equipos.....	26
Capítulo IV. Resultados	28
4.1 Análisis granulométrico y porosidad	28
4.1.1 Medio filtrante	28
4.1.2 Medio de soporte	29
4.2 Resumen de resultados	30
4.3 pH y temperatura	35
4.3.1 Configuración N°01	35
4.3.2 Configuración N°02	35
4.4 Turbiedad	39
4.4.1 Configuración N°01	39

4.4.2 Configuración N°02	39
4.5 Oxígeno disuelto	43
4.5.1 Configuración N°01	43
4.5.2 Configuración N°02	43
4.6 Conductividad	47
4.6.1 Configuración N°01	47
4.6.2 Configuración N°02	47
4.7 Transmitancia	51
4.7.1 Configuración N°01	51
4.7.2 Configuración N°02	51
4.8 Dosis media efectiva	55
4.9 Coliformes termotolerantes (C.T.)	57
4.9.1 Configuración N°01	57
4.9.2 Configuración N°02	57
4.10 Sólidos suspendidos totales (SST)	61
4.10.1 Configuración N°01	61
4.10.2 Configuración N°02	61
4.11 Peróxido de hidrógeno residual	63
4.11.1 Configuración N°01	63
4.11.2 Configuración N°02	64
Capítulo V. Análisis y discusión de resultados	66
5.1 pH y temperatura	66
5.2 Turbiedad	68
5.3 Oxígeno disuelto	69
5.4 Conductividad	70
5.5 Transmitancia	71
5.6 Sólidos suspendidos totales	73
5.7 Peróxido de hidrógeno residual	74

5.8 Coliformes termotolerantes	76
5.8.1 Concentración de coliformes termotolerantes en el agua residual	76
5.8.2 Remoción de coliformes termotolerantes del proceso UV/H ₂ O ₂	76
5.8.3 Efecto de la dosis media efectiva en la eficiencias del tratamiento	86
5.9 Evaluación del cumplimiento de la normativa nacional.....	87
Conclusiones	89
Recomendaciones	92
Referencias bibliográficas.....	93
Anexos.....	99

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Resumen de resultados obtenidos de los antecedentes.	4
Tabla 2: Resumen de puntos de monitoreo.	24
Tabla 3: Métodos de medición de parámetros.	24
Tabla 4: Frecuencia de medición de parámetros.	25
Tabla 5: Periodos de investigación.	26
Tabla 6: Materiales para la construcción del reactor y el filtro de arena.	26
Tabla 7: Materiales, insumos y equipos de laboratorio.	27
Tabla 8: Material retenido en las mallas-medio filtrante.	28
Tabla 9: Resultados del análisis granulométrico-medio filtrante.	29
Tabla 10: Resultados del análisis de porosidad-medio filtrante.	29
Tabla 11: Material retenido en las mallas-medio de soporte.	29
Tabla 12: Curva granulométrica-medio de soporte.	30
Tabla 13: Resultados del análisis granulométrico-medio de soporte.	30
Tabla 14: Resultados del análisis de porosidad-medio de soporte.	30
Tabla 15: Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 10 segundos).	31
Tabla 16: Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 20 segundos).	32
Tabla 17: Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 30 segundos).	33
Tabla 18: Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 60 segundos).	34
Tabla 19: Resultados del rango del pH y temperatura-configuración N°01.	35
Tabla 20: Resultados del rango del pH y temperatura-configuración N°02.	35
Tabla 21: Resultados del rango de turbiedad-configuración N°01.	39
Tabla 22: Resultados del rango de turbiedad-configuración N°02.	39
Tabla 23: Resultados del rango del oxígeno disuelto-configuración N°01.	43
Tabla 24: Resultados del rango del oxígeno disuelto-configuración N°02.	43
Tabla 25: Resultados del rango de conductividad-configuración N°01.	47

Tabla 26: Resultados del rango de conductividad-configuración N°02.....	47
Tabla 27: Resultados del rango de transmitancia-configuración N°01.	51
Tabla 28: Resultados del rango de transmitancia-configuración N°02.	51
Tabla 29: Dosis media efectivas promedio aplicadas.....	55
Tabla 30: Resultados del rango de las dosis media efectivas aplicadas.....	55
Tabla 31: Resultados del rango de coliformes termotolerantes-Configuración N°01.....	57
Tabla 32: Resultados del rango de coliformes termotolerantes-Configuración N°02.....	57
Tabla 33: Resultados del rango de sólidos suspendidos totales-Configuración N°01.....	61
Tabla 34: Resultados del rango de sólidos suspendidos totales-Configuración N°02.....	61
Tabla 35: Resultados del rango de H ₂ O ₂ residual-configuración N°01.....	63
Tabla 36: Resultados del rango de H ₂ O ₂ residual-configuración N°02.....	64
Tabla 37: Variación porcentual del pH promedio.....	67
Tabla 38: Variación porcentual de la temperatura promedio.	68
Tabla 39: Variación porcentual de la turbiedad promedio.	69
Tabla 40: Variación porcentual del oxígeno disuelto promedio.	70
Tabla 41: Variación porcentual de la conductividad promedio.	71
Tabla 42: Variación porcentual de la transmitancia promedio.	72
Tabla 43: Variación porcentual de los SST promedio.....	73
Tabla 44: Variación porcentual del H ₂ O ₂ residual promedio.....	75
Tabla 45: Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes – Configuración N°01.....	77
Tabla 46: Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes – Configuración N°02.....	81

Tabla 47: Eficiencia total de remoción de coliformes termotolerantes –

Configuración N°02.82

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Diagrama de configuraciones de tratamiento.	12
Figura 2: Esquema del reactor fotoquímico.	15
Figura 3: Esquema del panel de lámparas UV.	15
Figura 4: Vista en planta del reactor fotoquímico construido.	15
Figura 5: Vista longitudinal del reactor fotoquímico construido.	16
Figura 6: Sistema eléctrico del reactor fotoquímico.	16
Figura 7: Esquema del filtro de arena.	17
Figura 8: Sección transversal y vista en planta del filtro de arena.	18
Figura 9: Vista frontal y vista en planta del filtro construido.	18
Figura 10: Recipiente de ingreso del agua residual.	18
Figura 11: Selección del medio filtrante.	19
Figura 12: Proceso de secado de la muestra de arena.	20
Figura 13: Determinación de la porosidad del medio filtrante.	21
Figura 14: Proceso de secado de la muestra de grava.	22
Figura 15: Determinación de la porosidad del medio de soporte.	22
Figura 16: Proceso de lavado del medio filtrante.	23
Figura 17: Curva granulométrica-medio filtrante.	28
Figura 18: pH y temperatura del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.	36
Figura 19: pH y temperatura Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.	37
Figura 20: pH y temperatura Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.	38
Figura 21: Turbiedad del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.	40
Figura 22: Turbiedad Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.	41
Figura 23: Turbiedad Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.	42
Figura 24: OD del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.	44

Figura 25: Oxígeno disuelto Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.....	45
Figura 26: Oxígeno disuelto Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.....	46
Figura 27: Conductividad del reactor UASB y del Filtro Vs N° de monitoreo.....	48
Figura 28: Conductividad Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.....	49
Figura 29: Conductividad Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.....	50
Figura 30: Transmitancia del reactor UASB y del Filtro Vs N° de monitoreo.....	52
Figura 31: Transmitancia Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.....	53
Figura 32: Transmitancia Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.....	54
Figura 33: Dosis medias efectivas aplicadas a las muestras del reactor UASB y del Filtro de arena Vs N° de monitoreo.....	56
Figura 34: Coliformes termotolerantes del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de ensayo.....	58
Figura 35: Coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°01....	59
Figura 36: Coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°02....	60
Figura 37: Sólidos suspendidos totales del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de ensayo.....	62
Figura 38: Sólidos suspendidos totales Vs N° de ensayo – Configuración N°01. .	62
Figura 39: Sólidos suspendidos totales Vs N° de ensayo – Configuración N°02. .	63
Figura 40: Peróxido de hidrógeno residual Vs N° de ensayo – Configuración N°01.....	64
Figura 41: Peróxido de hidrógeno residual Vs N° de ensayo – Configuración N°02.....	65
Figura 42: Grafica de Superficie de Respuesta – Configuración N°01.....	79
Figura 43: Grafica de Contorno de Superficie de Respuesta – Configuración N°01.....	79
Figura 44: Remoción de coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°01.	80
Figura 45: Grafica de Superficie de Respuesta – Configuración N°02.....	83

Figura 46: Grafica de Contorno de Superficie de Respuesta –Configuración	
Nº02.....	83
Figura 47: Remoción de Coliformes termotolerantes Vs Nº de ensayo –	
Configuración Nº02.	84
Figura 48: Remoción total de coliformes termotolerantes Vs Nº de ensayo –	
Configuración Nº02.	85
Figura 49: Remoción de coliformes termotolerantes y dosis efectivas Vs Nº de	
ensayo.	86

Introducción

El tratamiento de aguas residuales domésticas es un proceso esencial para garantizar la salud pública y del medioambiente, asegurando que los efluentes no afecten los cuerpos de agua receptores y favoreciendo su posible reutilización en actividades agrícolas. Entre las tecnologías empleadas, los reactores UASB han demostrado ser una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales y semitropicales como las que podemos encontrar en el país. Sin embargo, el efluente resultante aún puede contener grandes concentraciones de microorganismos patógenos, por lo que es necesario realizar un tratamiento adicional.

En este contexto los procesos de oxidación avanzada (POA), los cuales han demostrado ser muy eficientes en el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales, podrían emplearse para tratar estos efluentes anaerobios debido a su capacidad de generar radicales hidroxilos altamente reactivos, que pueden remover materia orgánica y microorganismos patógenos.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB en la planta piloto CITRAR-FIA-UNI, mediante la aplicación del proceso oxidación avanzada UV/H₂O₂ con y sin proceso de filtración previo, para luego comparar los resultados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en la normativa nacional.

Esta investigación además busca contribuir al desarrollo de alternativas de tratamiento apropiadas para la desinfección de aguas residuales domésticas sin la aplicación de cloro.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.

1.1 Generalidades

La desinfección de aguas residuales es un proceso de vital importancia, para proteger tanto la salud pública como el medio ambiente, al ser el proceso responsable de la eliminación de patógenos presentes en estas aguas.

SUNASS (2022) señaló en su informe de diagnóstico de las PTAR del país, que lamentablemente en la actualidad nuestras plantas de tratamiento de aguas residuales cuentan con inexistentes o deficientes sistemas de desinfección, produciendo efluentes con altas concentraciones de patógenos, haciendo imposible su descarga o reutilización.

Con base en el contenido de este documento, el presente estudio tiene como objetivo explorar una alternativa para la eliminación de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB en la planta piloto CITRAR-FIA-UNI, aplicando el proceso UV/H₂O₂.

1.2 Descripción del problema de investigación

A fin de mejorar la calidad de efluentes de reactores UASB con respecto a coliformes termotolerantes, se propone una alternativa compuesta de un reactor UV de acero inoxidable con lámparas UV-C suspendidas o sin contacto, donde ingresará el agua residual con distintas dosis de peróxido de hidrógeno. Además, se evaluará la eficacia del proceso con y sin un proceso de filtración previo mediante un filtro de arena con características de lecho filtrante poco profundo.

Este estudio aportará el conocimiento a fin de poder descubrir posibles alternativas de reúso y vertimientos de estos efluentes.

1.3 Justificación e importancia

El proceso UV/H₂O₂ como tecnología para la eliminación efectiva de coliformes fecales o termotolerantes de efluentes producidos por reactores UASB, es una tecnología compacta y que aparentemente no produce subproductos perjudiciales.

Esta tecnología de resultar satisfactoria podría ser factible de aplicar como proceso de tratamiento posterior a un reactor UASB en zonas urbanas y rurales donde no se cuente con disponibilidad de mucho terreno.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes mediante la aplicación del proceso de oxidación avanzada UV/H₂O₂ al efluente proveniente de un reactor UASB.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente la dosis de H₂O₂ y su tiempo de contacto a la luz UV óptimos para obtener el mayor rendimiento de eliminación de coliformes termotolerantes del efluente proveniente de un reactor UASB.
- Determinar si la combinación de un proceso de filtración mediante un filtro de arena y posterior aplicación del proceso UV/H₂O₂ aumenta la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, en comparación al uso del proceso UV/H₂O₂ solo.
- Realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica antes y después de la aplicación del proceso de desinfección estudiado. (Oxígeno disuelto, pH, turbiedad, conductividad, temperatura, transmitancia, sólidos suspendidos totales, peróxido de hidrógeno residual y coliformes termotolerantes)
- Tomar como referencia los valores establecidos en el Decreto Supremo N°003-2010-MINAM (LMP) y N°004-2017-MINAM (ECA), referido al ítem de coliformes termotolerantes, para evaluar la eficiencia del tratamiento del efluente del reactor UASB mediante el proceso UV/H₂O₂.

1.5 Hipótesis

Se espera una remoción superior a 4 unidades logarítmicas (Equivalente al 99.99%) de la concentración de coliformes termotolerantes del efluente de un reactor UASB mediante la aplicación del proceso UV/H₂ O₂ con un proceso de filtración previo.

1.6 Antecedentes investigativos

Rizvi et al. (2013) evaluaron la desinfección del efluente de un reactor UASB mediante la aplicación del proceso UV/H₂ O₂ y otros procesos de oxidación avanzada, para el caso del proceso UV/H₂ O₂ la experimentación se llevó a cabo en modo batch dentro de un reactor cilíndrico de 3.5 cm de diámetro interno y 330 ml de capacidad, el cual contaba con una lámpara UV de mercurio de baja presión en el centro del reactor con una intensidad de radiación de 5 mW/cm². Los resultados de la investigación demostraron que se puede lograr un gran nivel de desinfección mediante la aplicación del proceso UV/H₂ O₂, el cual logro un 99.9% de inactivación de coliformes termotolerantes con un tiempo de irradiación UV de 60 s y dosis de H₂ O₂ de 112 mg/L.

Yasar et al. (2007) investigaron el recrecimiento de patógenos en efluentes de un reactor UASB desinfectados mediante el proceso UV/H₂ O₂ y otros procesos de oxidación avanzada alternativos, los experimentos fueron llevados en modo discontinuo o batch dentro de un fotoreactor cilíndrico con diámetro interno de 5 cm y una capacidad de 1 L, el cual contaba con una lámpara de mercurio de baja presión con una intensidad de radiación de 5 mW/cm². El estudio demostró que la aplicación de este proceso produce altas tasas de inactivación de patógenos, además de mostrar una nula reactivación microbiana. El tratamiento UV/H₂ O₂ logro eliminar más del 99.9% de coliformes termotolerantes con un tiempo de irradiación UV de 60 s y una dosis de H₂ O₂ de 170 mg/L.

Marques (2003) estudio la desinfección del efluente de una laguna anaerobia mediante el proceso de oxidación avanzada UV/H₂ O₂, la investigación empleo un sistema de desinfección de flujo continuo, el cual consistía en un reactor de mezcla compuesto por un depósito cilíndrico de 20 L adaptado con un mezclador mecánico, donde se

homogeneizaba el agua residual más el peróxido de hidrógeno y un reactor fotolítico UV de cuerpo trapezoidal con base cuadrangular de una capacidad aproximada de 1.15 L, el cual contenía en la parte inferior del reactor una lámpara UV con una intensidad de radiación de 11.26 mW/cm². Los resultados de la investigación demostraron que el proceso UV/H₂O₂ con una dosis y tiempo de contacto de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) de 10 mg/L y 12 minutos respectivamente combinado con un tiempo de irradiación UV de 2 s, lograron una remoción del 99.99% de coliformes termotolerantes.

De acuerdo con las investigaciones antecedentes, se realizó la Tabla 1 en la cual se resumen los datos más relevantes y resultados de cada investigación para tomarlos como punto de partida en la formulación de la hipótesis de la presente tesis. Considerando que el proceso ha demostrado eficiencias alrededor del 99.9% al 99.99% en efluentes anaerobios, lo que equivale a una remoción de 3 y 4 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes respectivamente, se espera una eficiencia de remoción igual o superior tanto para el tratamiento UV/H₂O₂ como para el tratamiento combinado compuesto por el Filtro de arena más el proceso UV/H₂O₂. En otras palabras, se espera una remoción mínima de 4.0 unidades logarítmicas o del 99.99% de coliformes termotolerantes.

Tabla 1

Resumen de resultados obtenidos de los antecedentes.

Antecedente	Afluente	H ₂ O ₂ (mg/l)	Tiempo de contacto	Intensidad de radiación UV	Configuración de reactor UV	Eficiencia de remoción
Rizvi et al. (2013)	UASB	112.0	60 s (UV)	5 mW/cm ²	De contacto	99.90%
Yasar et al. (2007)	UASB	170.0	60 s (UV)	5 mW/cm ²	De contacto	99.90%
Marques (2003)	Laguna Anaerobia	10.0	12 min (H ₂ O ₂) 2.0 s (UV)	11.26 mW/cm ²	De contacto	99.99%

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Características biológicas de las aguas residuales

Las aguas residuales contienen diversos microorganismos, como parásitos, bacterias, protozoos, hongos, algas y virus, cuyo desarrollo depende de la concentración de sustancias, el pH y la temperatura. En las aguas residuales domésticas, principalmente por los desechos fisiológicos humanos, los patógenos suelen ser de origen fecal. Para evaluar la calidad del agua, es fundamental utilizar indicadores de contaminación fecal, seleccionándolos adecuadamente según el estudio. Entre estos, los coliformes termotolerantes son los más comunes, ya que su presencia puede representar un riesgo para la salud en caso de contacto.

2.1.2 Coliformes termotolerantes

Los coliformes termotolerantes también denominados coliformes fecales pertenecen al grupo de bacterias Gram-negativas y cuentan con la habilidad de fermentar la lactosa y producir gas CO₂ a una temperatura de 44.5°C +/- 2 °C en un periodo de 24 +/- 2 horas. En su mayoría están representados por la *Escherichia coli* o *E. coli* (Larrea-Murrell et al., 2013).

De acuerdo con Mayo Clinic (2022) la *Escherichia coli* se encuentra naturalmente en la flora intestinal del ser humano, de las cuales la mayoría de sus cepas no ocasionan perjuicios a la salud, sin embargo, algunas de ellas son patógenas y pueden ocasionar una amplia variedad de infecciones que pueden ir desde diarreas leves, hasta críticas como diarreas con sangre provocadas por la cepa *E. coli* O157, la cual puede provocar una infección en el ser humano por el consumo de agua y alimentos contaminados.

2.1.3 Reactores UASB

Los reactores anaeróbicos de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) son una tecnología de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales empleada desde hace muchos años debido a su gran eficiencia en el tratamiento de aguas residuales con

altas cargas orgánicas, permitiendo que los reactores sean de menor tamaño. La eficacia de los reactores UASB radica en la formación de un lecho denso de lodos en el fondo del reactor en el que se lleva a cabo todos los procesos biológicos que permiten la estabilización de la materia orgánica (Becerra Moreno et al., 2022).

Sin embargo, los efluentes provenientes de estos reactores habitualmente de un tratamiento complementario para eliminar los residuos de materia orgánica, nutrientes y patógenos que no fueron eliminados durante la digestión anaerobia.

2.1.4 Desinfección en aguas residuales

Es un proceso importante en el tratamiento de aguas residuales que tiene como finalidad eliminar o inactivar los organismos patógenos que se encuentren en ellas, garantizando la calidad microbiológica del agua (Ocampo-Rodríguez et al., 2022).

Según SUNASS (2022), la desinfección de aguas residuales puede llevarse a cabo mediante procesos químicos como el uso del cloro y sus derivados, a través de procesos físicos como el uso de radiación ultravioleta o a través de procesos biológicos como el uso de lagunas.

Sin embargo, a pesar de que el cloro es un desinfectante que ha demostrado una gran eficacia, Reyes López (2016) menciona que la mayor desventaja de la desinfección con cloro es la formación de subproductos tóxicos que pueden ser altamente cancerígenos en concentraciones bajas.

2.1.5 Desinfección ultravioleta

La desinfección ultravioleta o UV es un proceso de reacción fotoquímica causado por la radiación de fotones ultravioleta. Este método puede eliminar eficazmente bacterianas, esporas, protozoos, virus y contaminantes orgánicos en el agua mediante la absorción de energía de los rayos ultravioletas en el sistema de los microorganismos produce el impacto de ruptura de las cadenas corrosivas de proteínas amino de los aminoácidos de proteínas, obstaculizando así la síntesis de ribosoma de la proteína que causa una disrupción metabólica (Feng et al., 2021). Asimismo, desactiva el crecimiento y

la replicación de microorganismos al afectar directamente su ácido desoxirribonucleico (Gelete et al., 2021).

El proceso de desinfección UV de las aguas residuales normalmente utiliza lámparas de mercurio de baja presión en la longitud de onda de 254 nm (UV-C). Este rango de radiación altera la estructura y función de los ácidos nucleicos, inhibiendo la replicación del ADN e inactivando las células microbianas (Atoche Garay et al., 2021).

En este proceso la inactivación bacteriana está relacionada directamente con la intensidad de la radiación, una mayor inactivación de microorganismos se obtiene con una mayor intensidad de radiación (Obregón Ramírez, 2017).

Según USEPA (1999), existen dos configuraciones de reactores en los sistemas de desinfección UV, los reactores de contacto y sin contacto, los cuales se diferencian en que los primeros poseen las lámparas UV sumergidas en contacto con el agua, mientras que las otras poseen las lámparas suspendidas y como su nombre lo indica sin contacto con el agua.

2.1.6 Intensidad de radiación UV

En los procesos de tratamiento que emplean radiación UV, se consideran dos tipos de intensidad de radiación. La intensidad media aplicada a la superficie del reactor, emitida por el conjunto de lámparas denominada I_o y la intensidad media efectiva, denominada I_m que toma en cuenta la atenuación causada por la absorción de la radiación en el medio líquido (Souza et al., 2012).

Para determinar la I_o se puede emplear equipos de medición como radiómetros UV-C o mediante aproximaciones teóricas, sin embargo, en el caso de la I_m es fundamental conocer la absorbancia del medio, debido a que esta brindara información sobre la capacidad de absorción de energía de los compuestos químicos y otras sustancias presentes en el agua, como materia disuelta y partículas en suspensión que pueden reducir la intensidad de la radiación que atraviesa la masa líquida (Daniel, 2001).

Souza et al. (2012) menciona que primero será necesario calcular el coeficiente de absorción del medio, mediante la Ecuación (1).

$$\alpha = A \times \ln(10) \quad (1)$$

Donde:

α = Coeficiente de absorción (cm^{-1})

A = Absorbancia a 254 nm (cm^{-1})

Finalmente una vez determinado el coeficiente de absorción, se puede calcular la Intensidad media efectiva I_m , mediante la Ecuación (2) (Souza et al., 2012).

$$I_m = \frac{I_o}{\alpha \times L} \times (1 - e^{-\alpha \times L}) \quad (2)$$

Donde:

I_m = Intensidad media efectiva (mW/cm^2)

I_o = Intensidad de radiación UV emitida por la fuente (mW/cm^2)

α = Coeficiente de absorción (cm^{-1})

L = Espesor de la lámina de agua (cm)

2.1.7 Dosis de radiación UV

Corresponde a la cantidad de energía que se necesita para destruir o inactivar un microorganismo a través de la exposición a la luz ultravioleta. Según Ponce Ochoa (2005) el termino dosis UV se emplea para describir la capacidad total de energía absorbida por un microorganismo, para eliminar e inhabilitar su reproducción. Por lo que, la dosis UV efectiva se calcula como el producto de la intensidad de radiación media efectiva y el tiempo de exposición UV (Souza et al., 2012). Como se muestra en la Ecuación (3):

$$D_m = I_m \times T \quad (3)$$

Donde:

D_m = Dosis UV efectiva (mWs/cm^2)

I_m = Intensidad media efectiva (mW/cm^2)

T = Tiempo de exposición UV (s)

2.1.8 Tiempo de exposición UV

El tiempo de exposición UV es el periodo durante el cual el agua contaminada se expone a la radiación ultravioleta para desinfectar o inactivar los microorganismos

presentes en ella. Existe una relación no lineal entre la introducción de la radiación UV y la idoneidad germicida, es decir, en el supuesto que un tiempo de exposición específico elimine aproximadamente el 90% de una población bacteriana, multiplicar el tiempo o el aumento de la exposición puede inactivar hasta el 99%. Además, una disminución del 50% en las medidas o el tiempo de introducción debería disminuir la viabilidad germicida de un 99% a un 90% (Correa et al., 2020).

2.1.9 Factores que influyen en la desinfección UV

La eficiencia del proceso de desinfección UV puede verse afectada por la turbiedad del agua, las concentraciones de sólidos en suspensión, los microorganismos, los agregados celulares, los lixiviados y la densidad del fluido (Lazarotto et al., 2022). Por lo tanto es crucial monitorear la turbiedad y el color del agua ya que son barreras naturales para la transmisión de los rayos ocasionando un efecto negativo en la transmitancia de la luz UV (Obregón Ramírez, 2017).

Otro factor muy importante es la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), mientras más altas sean estas concentraciones, menor es la luz UV que es absorbida por los microorganismos (Obregón Ramírez, 2017). Por ello el uso de lámparas UV de baja presión para la desinfección del agua no es tan efectivo en el caso de afluentes con niveles de SST mayores a 30 ppm (USEPA, 1999).

2.1.10 Procesos de oxidación avanzada

Estos procesos pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilos de potencial de oxidación mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales; y son capaces de mineralizar y oxidar casi cualquier molécula orgánica produciendo algunos aniones inorgánicos y CO₂ (Amaro Soriano, 2022).

Los procesos se clasifican en dos grandes bloques: los procesos fotoquímicos, que emplean la radiación en la región del ultravioleta para generar los radicales hidroxilos, y los procesos de oxidación avanzada no fotoquímicos, en el que los radicales hidroxilos se forman a través de la transformación de especies químicas o mediante el uso de otras fuentes de energía distintas de la luz (Amaro Soriano, 2022).

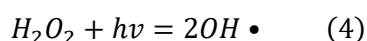
Según Obregón Ramírez (2017) generalmente, los dos mecanismos principales que controlan la eficiencia en la desinfección con radicales hidroxilo son:

- La oxidación y rompimiento de la pared y la membrana celular que resulta en la desintegración de la célula;
- La difusión del desinfectante dentro de la célula o la partícula infecciosa donde puede inactivar enzimas, dañar componentes intracelulares, interferir con la síntesis de proteínas, etc.

2.1.10.1 Proceso UV/H₂O₂.

Este POA implica la formación de radicales hidroxilos cuando la luz UV es absorbida directamente por el H₂O₂, por lo que son generados mediante la fotólisis del peróxido de hidrógeno (Obregón Ramírez, 2017).

El proceso combinado UV/H₂O₂ tiene la capacidad de acelerar la generación de radicales hidroxilos que son capaces de transformar diversos compuestos orgánicos tóxicos/recalcitrantes en productos más biodegradables y menos peligrosos, proporcionando, de esta forma mejoras en el tratamiento de las aguas residuales (Rodríguez Urviola & Neira Paniura, 2020). El mecanismo de disociación de la molécula de peróxido de hidrógeno mediante la energía de los fotones produce dos radicales hidroxilos OH• tal como se observa en la Ecuación (4):



En el caso de microorganismos, estos radicales atacan la doble capa bilipídica de la pared externa de la célula, generando reacciones de peroxidación lipídica mortales para el microorganismo (García Suescun, 2010). Por lo que poseen un gran poder desinfectante comprobado.

Según Primo Martínez (2008) algunos de los parámetros más relevantes que influyen en el proceso UV/H₂O₂ son los siguientes:

- Concentración de peróxido de hidrógeno (H₂O₂): La eficiencia de proceso tiende a aumentar con la concentración de H₂O₂.

- pH: Usualmente opera con gran eficiencia en rangos bajos (2.5-3.5).
- Secuestradores de radicales hidroxilos: Como los aniones carbonato, bicarbonato, sulfato y otros aniones inorgánicos.
- Intensidad de la radiación UV: Una mayor intensidad de radiación puede acelerar la generación de radicales hidroxilos aumentando la eficiencia del proceso.
- Transmitancia (%T): Definida por la turbiedad y el color del medio, así como la presencia de sólidos en suspensión que provocan un efecto de obstrucción o bloqueo impidiendo que la luz ultravioleta penetre adecuadamente en la solución.
- Absorbancia (A): Denominado densidad óptica, indica la cantidad de radiación absorbida por la muestra y se calcula como función logarítmica de la transmitancia (%T) como se muestra en Ecuación (5):

$$A = 2 - \text{Log} (T\%) \quad (5)$$

2.2 Marco conceptual

H₂ O₂ : Es la formula química del compuesto químico peróxido de hidrógeno, el cual es un agente oxidante muy versátil empleado en el tratamiento de aguas, debido a su alta solubilidad en ellas.

UV-C: Radiación electromagnética con longitudes de onda entre 100 y 280 nanómetros, mayormente en 254 nm, Se caracteriza por su alta energía y eficacia en la inactivación de microorganismos al dañar su material genético, lo que impide su reproducción.

POA: Es la abreviatura de procesos de oxidación avanzada, son una tecnología empleada en el tratamiento de aguas residuales por su gran poder oxidativo, el cual les permite descomponer una gran variedad de compuestos orgánicos.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Ubicación de la investigación

La investigación fue desarrollada en la zona de tesis N°1 (Denominada Zona metanogénica) del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-FIA-UNI), localizada en la Av. Tupac Amaru, distrito de Rímac, departamento de Lima.

3.2 Afluente del sistema de tratamiento

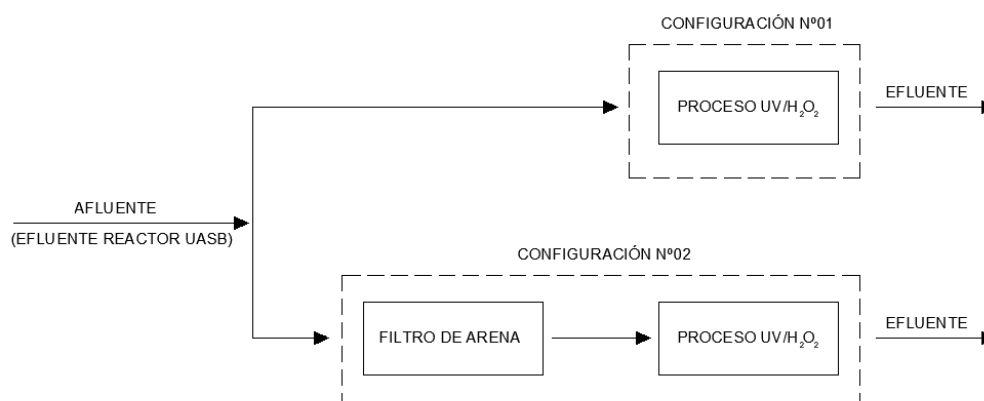
El agua residual empleada en la presente investigación provenía del efluente de los reactores UASB de la planta CITRAR-FIA-UNI. Se recolectaba aproximadamente 15 L de muestra de agua residual diariamente entre las 8:00 y 8:30 am, mediante un brazo muestreador y una galonera con capacidad de 5 galones, para luego ser transportadas hacia el módulo de investigación.

3.3 Descripción de la metodología

La presente investigación se realizó a escala piloto, consistió en tratar el efluente de un reactor UASB mediante el proceso de oxidación avanzada (UV/H₂O₂) con y sin un proceso de filtración previo, mediante el uso de un reactor fotoquímico y un filtro de arena.

Figura 1

Diagrama de configuraciones de tratamiento.



El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) usado en las pruebas fue una solución de peróxido de hidrógeno al 3% fabricada por el laboratorio ALKOFARMA E.I.R.L., la cual se almacena

siempre en un lugar fresco, seco y ventilado, su manipulación siempre fue con mascarilla y guantes siguiendo las recomendaciones del fabricante. Se evaluaron 06 dosis de peróxido de hidrógeno, 03 para las muestras de agua residual sin filtrar (112 mg/l, 170 mg/l y 300 mg/l) y 03 para las muestras filtradas (10 mg/l, 30 mg/l y 50 mg/l) para los tiempos de contacto UV de 10, 20, 30 y 60 segundos, los cuales fueron definidos tomando como base las investigaciones antecedentes y bibliografía.

La configuración N°01, consistió en agregar una determinada dosis de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a 2 litros de la muestra de agua residual recolectada, homogenizarla un par de segundos a 300 rpm con ayuda de un agitador magnético, para luego ser colocaba dentro del reactor fotoquímico, una vez dentro se colocaba el panel de lámparas UV sobre la cámara rectangular del reactor rápidamente, y se encendían las lámparas UV-C junto con el agitador magnético ubicado en la parte inferior del reactor, para poder iniciar el proceso UV/ H_2O_2 , luego de transcurrido un tiempo determinado se apagaba las lámparas, se retiraba la tapa del reactor y se procedía a tomar las muestras del efluente del tratamiento, luego se descartaba la muestra restante para poder enjuagar el reactor con agua potable y se repetía el procedimiento para las dosis de peróxido de hidrógeno restantes.

Para la configuración N°02, primero se filtraba aproximadamente 6 litros de la misma muestra de agua residual recolectada del día, a través de un filtro de arena con características de lecho reducido, una vez con la muestra filtrada se repetía el procedimiento descrito anteriormente para cada dosis de peróxido de hidrógeno y un tiempo de contacto UV determinado.

Para ambas configuraciones se tomaba dos muestras antes y después del proceso UV/ H_2O_2 para cada dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de exposición UV, debido a que la primera iba a ser empleada para todos los análisis fisicoquímicos diarios los cuales eran analizados en el Laboratorio de CITRAR-FIA-UNI, mientras que la segunda iba a ser empleada para los análisis microbiológicos, SST y transmitancia en el Laboratorio de Investigación de Agua "Otto Bruno Rosasco Gerkes" (LIA) y en el laboratorio de tesis de

la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para estas últimas en particular se agregó una solución de tiosulfato de sodio a las muestras para neutralizar el peróxido de hidrógeno residual del proceso y evitar que este siga desinfectando la muestra afectando la representatividad de los resultados. Cabe mencionar que solo durante las primeras semanas de la investigación todos los análisis fueron realizados en el LIA y en el laboratorio de tesis, para luego pasar a realizarse en los 03 laboratorios mencionados anteriormente.

3.4 Reactor fotoquímico

El reactor fotoquímico fue fabricado en acero inoxidable AISI 304, estuvo compuesto de una cámara rectangular donde se colocaba la muestra de agua residual, una cubierta o panel de lámparas UV donde se encontraban dispuestas equidistantemente 06 lámparas UV-C, un agitador magnético que se colocaba en la parte inferior del reactor y su sistema eléctrico que permitía apagar y prender las lámparas de manera rápida.

El reactor fotoquímico operó en modo discontinuo o batch y tuvo una configuración de reactor UV sin contacto o de lámparas UV suspendidas, en él ingresaban 2 L de la muestra de agua residual para cada prueba, resultando en una altura de la lámina de agua de aproximadamente 1.5 cm. La muestra se encontraba en constante agitación gracias al agitador magnético y su barra magnética, los cuales evitaban la sedimentación de los sólidos suspendidos simulando condiciones de operación reales.

La intensidad de radiación UV aplicada o irradiancia promedio aproximada del reactor fue estimada en 4.13 mW/cm^2 (Ver Anexo 2), la cual fue usada para calcular las dosis efectivas del tratamiento. Las dimensiones de los componentes del reactor fueron las siguientes:

- Panel de lámparas UV: 46 cm de largo, 30 cm de ancho y 8 cm de altura.
- Cámara rectangular: 46 cm de largo, 30 cm de ancho y 15 cm de altura.

Figura 2

Esquema del reactor fotoquímico.

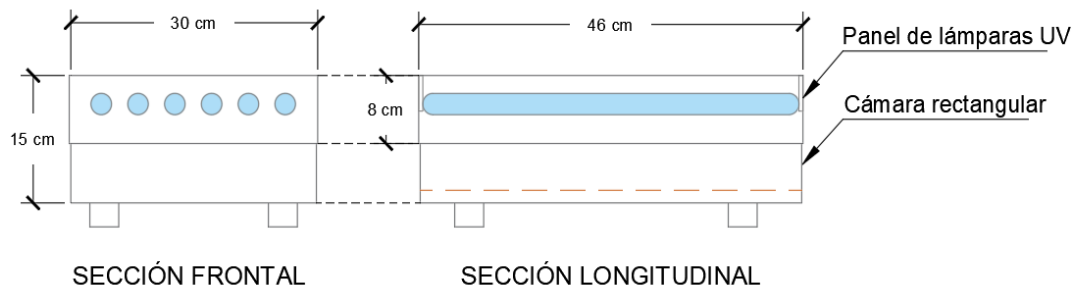


Figura 3

Esquema del panel de lámparas UV.

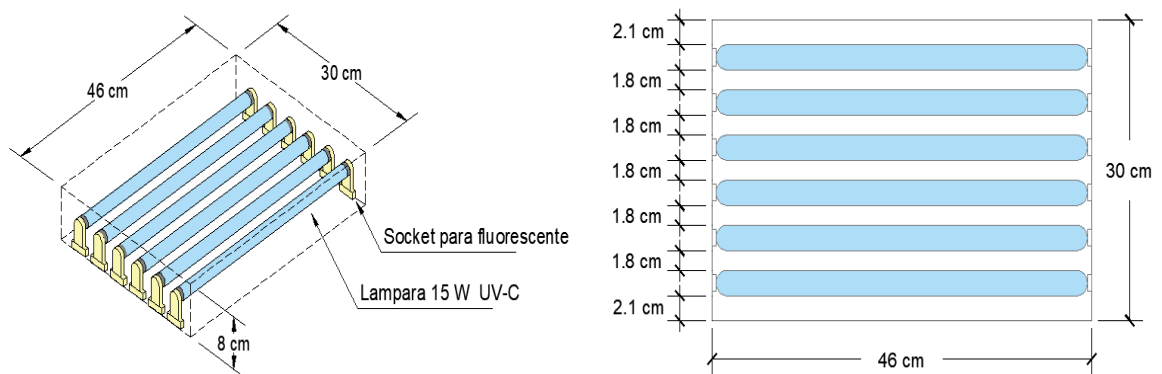


Figura 4

Vista en planta del reactor fotoquímico construido.

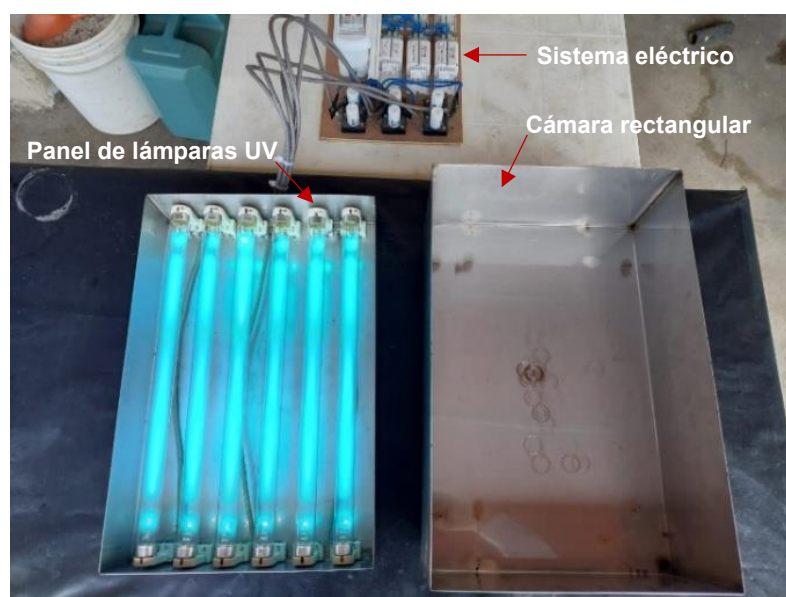


Figura 5

Vista longitudinal del reactor fotoquímico construido.

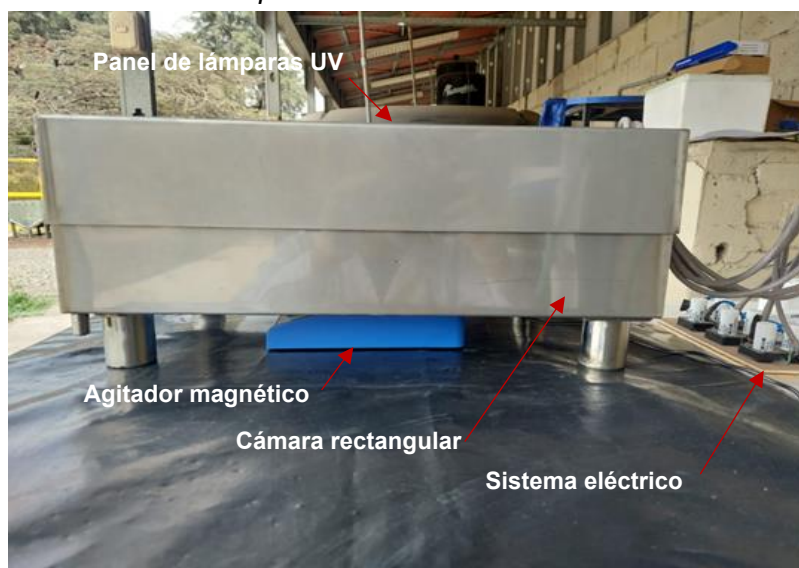
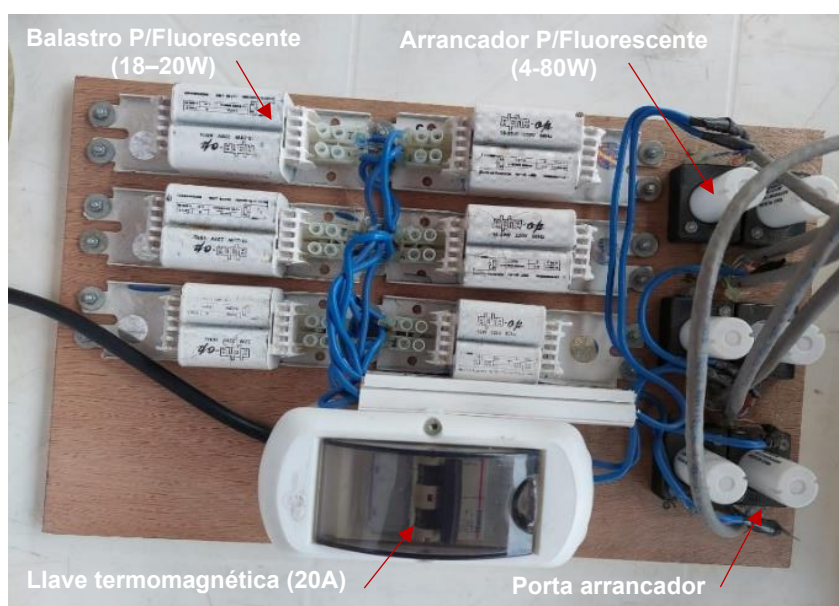


Figura 6

Sistema eléctrico del reactor fotoquímico.



3.5 Filtro de arena

El filtro de arena empleado en la investigación fue construido en un depósito cilíndrico de plástico gris de una capacidad aproximada de 30 L (29 cm de diámetro y 45 cm de altura), el cual se encontraba apoyado sobre una silla. El filtro tuvo como medio filtrante 30 cm de arena tipo sílica y como medio de soporte 10 cm de grava, en la base de

este se instaló un sistema de recolección del agua filtrada compuesto por tuberías, accesorios de PVC y una válvula esférica que permitía controlar la salida del agua filtrada, la cual era recolectada en un depósito plástico de 20 L ubicado abajo del filtro.

El ingreso del agua residual al filtro se realizó manualmente, en la parte superior del filtro se colocó un recipiente cilíndrico de plástico azul de aproximadamente 29 cm de diámetro y 5 cm de altura, el cual tenía agujeros distribuidos homogéneamente en toda su base, en este recipiente se colocaba la muestra de agua residual y por medio de los agujeros esta ingresaba en forma de gotas de agua en toda el área superficial del filtro, este ingreso se controló manualmente manteniendo la altura del agua residual en el recipiente hasta que se obtuviera la cantidad de agua filtrada necesaria para poder realizar las pruebas siguientes.

El filtro opero con una tasa de filtración aproximada de $7.29 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (Ver Anexo 3) y las características del medio filtrante como tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad, porosidad y profundidad de este fueron las características de un lecho poco profundo o lecho reducido.

Figura 7

Esquema del filtro de arena.

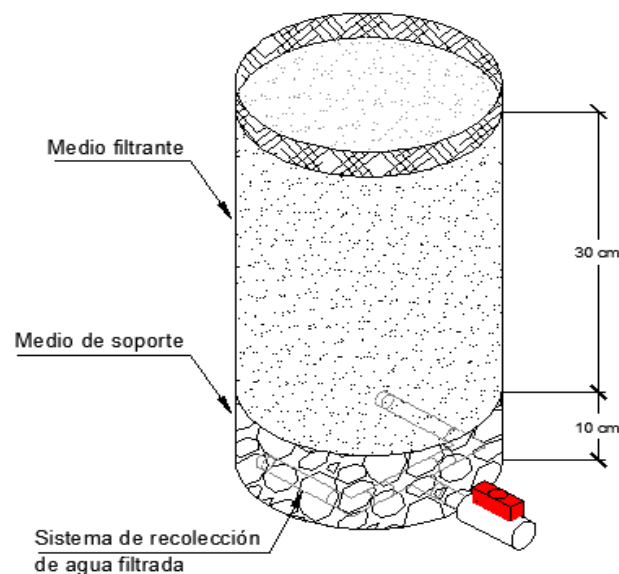


Figura 8

Sección transversal y vista en planta del filtro de arena.

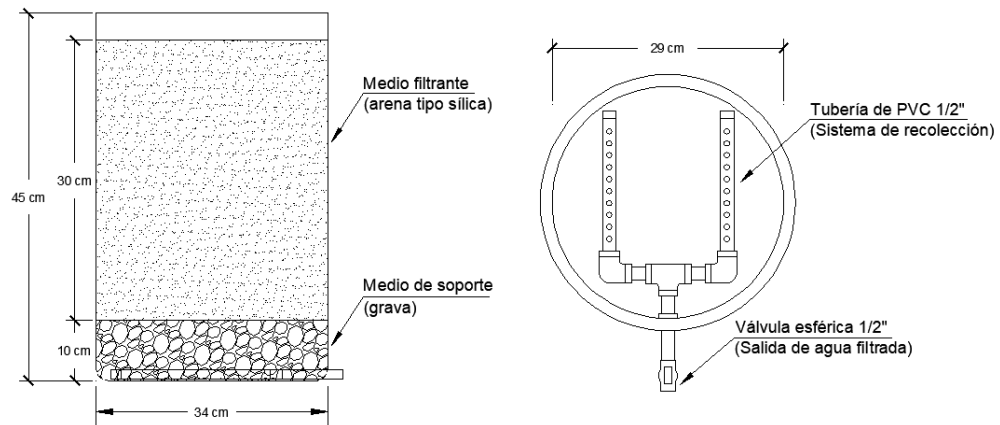


Figura 9

Vista frontal y vista en planta del filtro construido.



Figura 10

Recipiente de ingreso del agua residual.



3.5.1 Selección del medio filtrante

Para poder obtener las características de un lecho filtrante reducido o poco profundo fue necesario realizar un proceso de selección y tamizado a la arena adquirida, los sacos de arena fueron transportados al Laboratorio de Agua de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI, donde mediante el uso de un juego de tamices o mallas de acero inoxidable de laboratorio se seleccionó la arena por el tipo de malla.

Figura 11

Selección del medio filtrante.



Según Rojas Torres (2020) las mallas necesarias para poder conseguir las características deseadas eran las mallas N°25, 30, 35 y 40 (Mallas Estándar US-ASTM), es por ello que cuando se realizó el proceso de tamizado, solo se almacenó la arena retenida en las 04 mallas mencionadas y se descartó la retenida en las demás mallas.

Una vez tamizada y clasificada la arena, se homogenizó por completo, se extrajo una muestra y el resto se almacenó en sacos los cuales fueron transportados a CITRAR-FIA-UNI donde se iba a encontrar instalado el filtro. La muestra extraída fue utilizada para realizar la caracterización del material filtrante obtenido, para lo cual primero fue necesario lavarla cuidadosamente con agua potable y luego secarla en una estufa de laboratorio a 110 ± 5 °C durante 24 horas.

Figura 12

Proceso de secado de la muestra de arena.



3.5.1.1 Análisis granulométrico del medio filtrante.

Una vez obtenida la muestra de arena lavada completamente seca, se procedió a realizar el análisis granulométrico del material filtrante, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D6913. Para la realización del análisis se usó 1 kg de la muestra de arena.

3.5.1.2 Porosidad del medio filtrante.

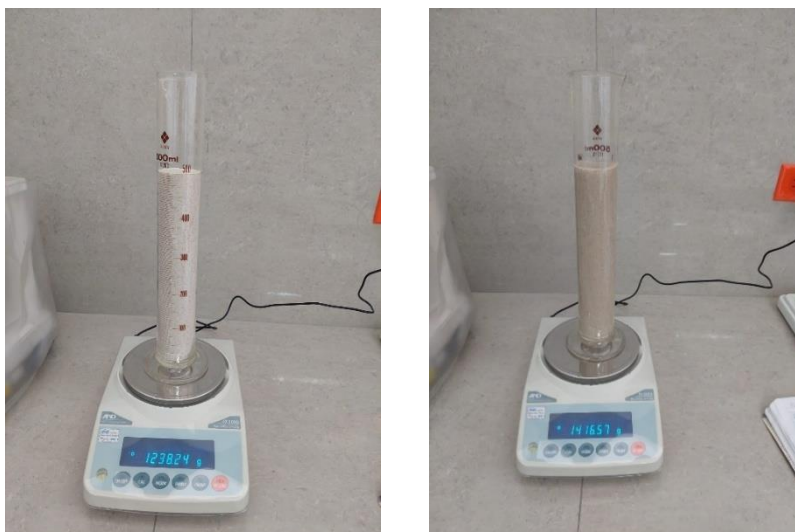
Para el cálculo de la porosidad se siguió el procedimiento realizado por Arboleda Valencia (1972), con la modificación de emplear para el análisis una probeta de 500 ml.

Primero se llenó la probeta hasta su máxima capacidad con la muestra de arena y se procedió a pesarla con ayuda de una balanza analítica, luego a la probeta con arena se le agregó agua potable hasta saturar por completo la muestra de arena y se pesó nuevamente.

Con los datos obtenidos se obtuvo el peso y volumen del agua en la probeta el cual era equivalente al volumen del espacio poroso de la arena. Finalmente, se calculó la porosidad del medio filtrante dividiendo el volumen del espacio poroso entre el volumen total de la muestra de arena.

Figura 13

Determinación de la porosidad del medio filtrante.



3.5.2 Selección del medio de soporte

Para la selección del medio de soporte se transportó 01 saco de grava para acuarios al laboratorio de agua de la FIA-UNI donde se realizó el mismo procedimiento de tamizado que se hizo para el medio filtrante, siguiendo las recomendaciones de Rojas Torres (2020), el cual uso las mallas N°3, 4 y 5 para seleccionar su medio de soporte. Sin embargo, debido a que el laboratorio solo contaba con la malla N°4 se usaron las mallas más cercanas a las recomendadas, por ello el proceso de selección se realizó con las mallas N°3 1/2, 4 y 8.

Luego de obtener y almacenar solo la grava atrapada en los tamices mencionados se extrajo una muestra para realizar la caracterización del medio y el resto se transportó a CITRAR-FIA-UNI.

Previo a la realización de los análisis la muestra de grava fue lavada cuidadosamente con agua potable y luego secada en una estufa de laboratorio a 110 ± 5 °C durante 24 horas.

Figura 14

Proceso de secado de la muestra de grava.



3.5.2.1 Análisis granulométrico del medio de soporte.

El análisis granulométrico del medio de soporte se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D6913. Para la realización del análisis se usó 1 kg de la muestra de grava.

3.5.2.2 Porosidad del medio de soporte.

Para el cálculo de la porosidad se siguió el procedimiento realizado por Arboleda Valencia (1972), con la modificación de emplear para el análisis una probeta de 250 ml.

Figura 15

Determinación de la porosidad del medio de soporte.



3.6 Mantenimiento del sistema

Después de cada prueba se enjuagaba con agua potable la cámara rectangular del reactor fotoquímico donde se colocaba la muestra de agua residual para poder eliminar cualquier resto de la muestra o peróxido de hidrógeno remanente.

En el caso del panel de lámparas UV del reactor, con ayuda de un pañuelo se limpiaba la superficie de las lámparas UV-C luego de cada ensayo para eliminar las manchas de salpicaduras que ocurrían dentro del reactor provocadas por la rotación de la barra magnética.

Respecto al filtro de arena, el lavado del medio filtrante y de soporte se realizaba cada 02 días debido a que durante el periodo de pruebas iniciales se descubrió que el filtro se saturaba a los 03 días afectando la calidad del efluente. La limpieza de los medios se realizó manualmente extrayendo la arena y grava en depósitos para luego enjuagarlos con agua potable hasta que el agua de enjuague quedara cristalina.

Figura 16

Proceso de lavado del medio filtrante.



3.7 Puntos de monitoreo

Se estableció la cantidad de 08 puntos de monitoreo en función a las dosis estudiadas, cada una era obtenida de ensayos individuales realizados diariamente para los tiempos de contacto UV de 10, 20, 30 y 60 segundos.

Tabla 2*Resumen de puntos de monitoreo.*

Puntos	Descripción
Nº 01	Efluente del reactor UASB
Nº 02	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 112 mg/l (UASB)
Nº 03	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 170 mg/l (UASB)
Nº 04	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 300 mg/l (UASB)
Nº 05	Efluente del filtro de arena (UASB Filtrado)
Nº 06	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 10 mg/l (Filtro de arena)
Nº 07	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 30 mg/l (Filtro de arena)
Nº 08	Efluente del proceso UV/H ₂ O ₂ - Dosis 50 mg/l (Filtro de arena)

3.8 Parámetros evaluados

Tabla 3*Métodos de medición de parámetros.*

Parámetro	Método
pH	"APHA-AWWA-WEF" Parte 4500-H+ B, 23rd Edición, 2017. "Método Electrométrico"
Temperatura	"APHA-AWWA-WEF" Parte 2550 B, 23rd Edición, 2017. "Método de Laboratorio y Campo"
Turbiedad	"APHA-AWWA-WEF" Parte 2130 B, 23rd Edición, 2017. "Método Nefelométrico"
Oxígeno disuelto	"APHA-AWWA-WEF" Parte 4500-O G, 23rd Edición, 2017. "Método de Electrodo de Membrana"
Conductividad	"APHA-AWWA-WEF" Parte 2510 B, 23rd Edición, 2017. "Método de Laboratorio"
Coliformes termotolerantes	"APHA-AWWA-WEF" Parte 9221 E, 23rd Edición, 2017. "Técnica de Fermentación en Tubos Múltiples"
Sólidos suspendidos totales	"APHA-AWWA-WEF" Parte 2540 D, 23rd Edición, 2017. "Método Gravimétrico"
Transmitancia	Guide UV-VIS Spectrophotometer UV-1700. "Método Espectrofotometría UV-Visible"
Peróxido de hidrógeno residual	QUANTOFIX® Peroxid Test Strips. "Método Colorimétrico con tiras reactivas"

3.9 Frecuencia de monitoreo

Tabla 4

Frecuencia de medición de parámetros.

Parámetro	Frecuencia de monitoreo
pH	Diariamente
Temperatura	Diariamente
Turbiedad	Diariamente
Oxígeno disuelto	Diariamente
Conductividad	Diariamente
Absorbancia/Transmitancia	Diariamente
Coliformes termotolerantes	2 veces por semana
Sólidos suspendidos totales	1 vez por semana
Peróxido de hidrógeno residual	1 vez por semana

3.10 Periodos de investigación

La investigación estuvo conformada por 05 periodos, definidos por los 04 tiempos de contacto UV estudiados y el periodo de pruebas iniciales donde se realizó la selección del material filtrante y soporte del filtro, la evaluación del funcionamiento del filtro para determinar su tiempo de saturación y finalmente la realización de múltiples pruebas para determinar el rango en el que se encontraban los coliformes termotolerantes del afluente y efluente del proceso de tratamiento para todas las dosis y tiempos de contacto UV, con el propósito de establecer un rango adecuado de dilución en la metodología de cuantificación.

Cabe mencionar que durante las pruebas iniciales de ensayo y error para determinar el rango adecuado de dilución en la metodología de coliformes termotolerantes, se utilizó el método de filtración por membrana, sin embargo, debido a que este método resultaba ser excesivamente sensible en algunas ocasiones, lo que generaba resultados inconsistentes o atípicos, se decidió cambiar al método de tubos múltiples, con el cual se trabajó a lo largo de toda la investigación.

Tabla 5*Periodos de investigación.*

	Periodo	Fecha Inicial	Fecha Final	Semanas
Nº 01	Pruebas iniciales	6/05/2024	20/06/2024	1-7
Nº 02	Tiempo de contacto UV (10s)	24/06/2024	19/07/2024	8-11
Nº 03	Tiempo de contacto UV (20s)	22/07/2024	23/08/2024	12-15
Nº 04	Tiempo de contacto UV (30s)	26/08/2024	20/09/2024	16-19
Nº 05	Tiempo de contacto UV (60s)	23/09/2024	25/10/2024	20-23

3.11 Materiales, insumos y equipos**Tabla 6***Materiales para la construcción del reactor y el filtro de arena.*

Reactor fotoquímico	Cantidad	
Planchas de acero inoxidable AISI 304 de 1.5 mm de espesor	2	und
Lámparas UV-C de 15 W marca Donilux	6	und
Sockets simples para fluorescentes	12	und
Arrancadores para fluorescentes 4-80 W marca Klik	6	und
Porta arrancadores para fluorescentes marca Bticino	6	und
Balastros para fluorescentes de 18-20 W marca Alpha	6	und
Llave termomagnética de 20 A marca Bticino	1	und
Agitador magnético, 3 litros, 3000 RPM, marca Intlab	1	und
Barra magnética de 1"	1	und
Extensión eléctrica de 03 tomas y 10 metros de longitud.	1	und
Triplay de 38 cm x 25 cm	2	und
Cableado clase 2 para conexión de fluorescentes	8	m
Filtro de arena	Cantidad	
Depósito cilíndrico de plástico de 30 L	1	und
Niples de PVC de ½"	4	und
Codos de PVC de ½"	2	und
Tee de PVC de ½"	1	und
Tapones de PVC de ½"	2	und
Válvula esférica de PVC de ½"	1	und
Sacos de 40 Kg de arena tipo sílica para acuarios	3	und
Saco de 20 Kg de grava para acuarios	1	und
Depósito de plástico de 20 L para recolección	1	und
Depósito de plástico de 3 L para ingreso del agua	1	und

Tabla 7*Materiales, insumos y equipos de laboratorio.*

Materiales de laboratorio					
	Cantidad				Cantidad
Tamices analíticos ASTM N°0.265-N°200	1	und		Vaso de precipitados 50 ml	1 und
Probeta 500 ml	1	und		Erlenmeyer 250 ml	1 und
Probeta 250 ml	1	und		Bagueta de vidrio	1 und
Frascos de vidrio 100 ml	32	und		Piseta 1L	1 und
Tubos de ensayo 18mm x 150mm c/tapa	45	und		Embudo de filtración	1 und
Tubos de ensayo 16mm x 150mm c/tapa	144	und		Capsulas de porcelana	8 und
Tubos Durham	144	und		Pinzas de acero Inox.	1 und
Pipetas 1 ml	40	und		Desecador	1 und
Pipetas 10 ml	24	und		Frasco vidrio ámbar 150 ml	1 und
Portapipetas de acero inox.	2	und		Caja de Tecnopor	1 und
Gradillas para tubos de ensayo	6	und		Gel refrigerante	2 und
Canastillas de acero inox. para autoclave	4	und		Micropipeta 100-1000 ul	1 und
Mechero de alcohol	1	und		Filtros de fibra de vidrio	2 caja
Pera de succión	1	und		Tiras QUANTOFIX Peroxide 25	1 caja
Vaso de precipitados 2L	1	und		Tiras QUANTOFIX Peroxide 100	1 caja
Vaso de precipitados 100 ml	1	und		Tiras QUANTOFIX Peroxide 1000	1 caja
Equipos de laboratorio					
	Cantidad				Cantidad
Balanza analítica Shimadzu AY-120	1	und		Espectrofotómetro Shimadzu UV-1700	1 und
Plancha eléctrica	1	und		Autoclave	1 und
pH meter portátil PH 02	1	und		Estufa de laboratorio	1 und
Conductímetro Oakton PC 2700	1	und		Incubadora de laboratorio 35 °C	1 und
Turbidímetro Hach 2100Q	1	und		Baño maría de laboratorio 44.5 °C	1 und
Oxímetro Hach 40d multi	1	und		Equipo de filtración c/manifold y trampa	1 und
Insumos					
	Cantidad				Cantidad
Agua destilada	10	l/sem	Peptona bacteriológica-Sigma Aldrich 500 gr	1	und
Solución de Peróxido de Hidrógeno 3%	10	l	Medio A1 - Himedia 500 gr	2	und
Tiosulfato de sodio	1	kg	Ron de quemar - Derqusa	5	l

Capítulo IV. Resultados

4.1 Análisis granulométrico y porosidad

4.1.1 Medio filtrante

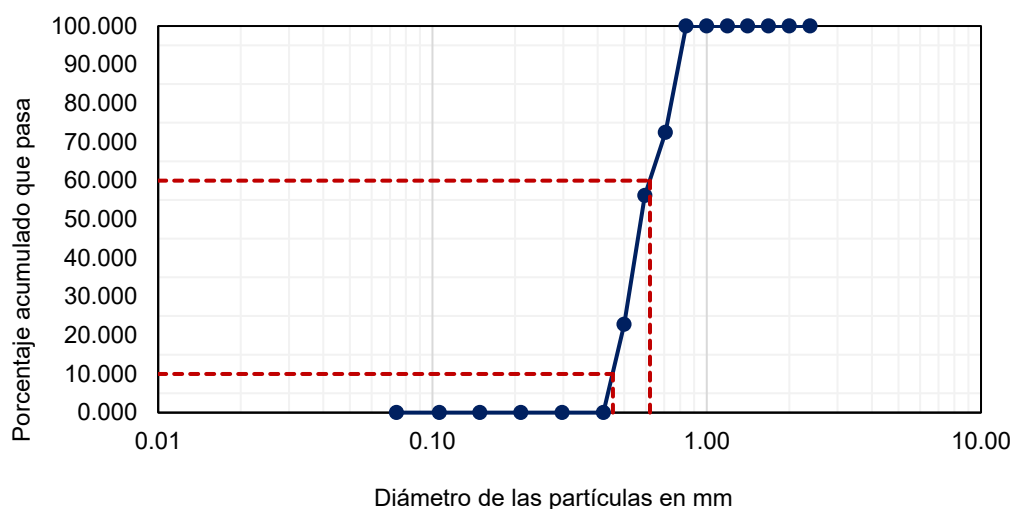
Tabla 8

Material retenido en las mallas-medio filtrante.

Malla N°	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
					Retenido	Pasa
8	0.094	2.380	0.000	0.000	0.000	100.000
10	0.079	2.000	0.000	0.000	0.000	100.000
12	0.066	1.680	0.000	0.000	0.000	100.000
14	0.056	1.410	0.000	0.000	0.000	100.000
16	0.047	1.190	0.000	0.000	0.000	100.000
18	0.039	1.000	0.000	0.000	0.000	100.000
20	0.033	0.841	0.000	0.000	0.000	100.000
25	0.028	0.707	275.500	27.550	27.550	72.450
30	0.023	0.595	162.940	16.294	43.844	56.156
35	0.020	0.500	333.510	33.351	77.195	22.805
40	0.017	0.420	228.050	22.805	100.000	0.000
50	0.012	0.297	0.000	0.000	100.000	0.000
70	0.008	0.210	0.000	0.000	100.000	0.000
100	0.006	0.149	0.000	0.000	100.000	0.000
140	0.004	0.106	0.000	0.000	100.000	0.000
200	0.003	0.074	0.000	0.000	100.000	0.000
Total			1000.000	100.000		

Figura 17

Curva granulométrica-medio filtrante.



Una vez obtenida la curva granulométrica, se comparó las características halladas con los valores recomendados por Romero Rojas (2004), confirmando de esta manera que el material filtrante del filtro tendrá las características de un lecho poco profundo o reducido.

Tabla 9

Resultados del análisis granulométrico-medio filtrante.

Características	Valor	Intervalo recomendado
Profundidad	30 cm	[25-30]
Tamaño efectivo (D10)	0.46 mm	[0.35-0.60]
Coefficiente de uniformidad (Cu)	1.36	[1.20-1.60]

Tabla 10

Resultados del análisis de porosidad-medio filtrante.

	Peso (g)	Volumen (ml)
Probeta + Medio filtrante	1238.24	500.00
Probeta + Medio filtrante + Agua	1416.57	500.00
Agua	178.33	178.33

Según los resultados presentados en la Tabla 10, la porosidad del medio filtrante es igual a 35.70%, valor consistente con resultados reportados en investigaciones previas, que estudiaron filtros de arena con características de lecho reducido.

4.1.2 Medio de soporte

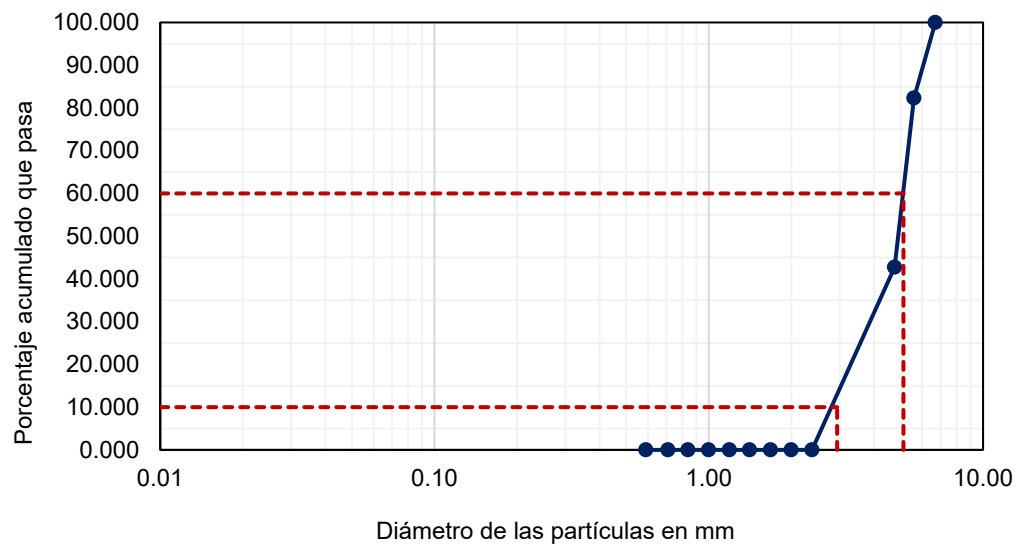
Tabla 11

Material retenido en las mallas-medio de soporte.

Malla N°	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	
					Retenido	Pasa
0.265	0.264	6.700	0.000	0.000	0.000	100.000
3 1/2	0.22	5.600	176.730	17.673	17.673	82.327
4	0.187	4.760	395.880	39.588	57.261	42.739
8	0.094	2.380	427.390	42.739	100.000	0.000
10	0.079	2.000	0.000	0.000	100.000	0.000
1	0.066	1.680	0.000	0.000	100.000	0.000
14	0.056	1.410	0.000	0.000	100.000	0.000
16	0.047	1.190	0.000	0.000	100.000	0.000
18	0.039	1.000	0.000	0.000	100.000	0.000
20	0.033	0.840	0.000	0.000	100.000	0.000
Total			1000.000	100.000		

Tabla 12

Curva granulométrica-medio de soporte.



Finalmente, con los datos obtenidos de la curva granulométrica, se elaboró la Tabla 13 la cual resume las características del medio de soporte con el que operó el filtro.

Tabla 13

Resultados del análisis granulométrico-medio de soporte.

Características	Valor
Profundidad	10 cm
Tamaño efectivo (D10)	2.94 mm
D60	5.12 mm
Coefficiente de uniformidad (Cu)	1.75

Tabla 14

Resultados del análisis de porosidad-medio de soporte.

	Peso (g)	Volumen (ml)
Probeta + Medio filtrante	453.65	250.00
Probeta + Medio filtrante + Agua	549.20	250.00
Agua	95.55	95.55

Según los resultados presentados en la Tabla 14, la porosidad del medio de soporte con el que operó el filtro es igual a 38.20%.

4.2 Resumen de resultados

El resumen de resultados se muestra a continuación

Tabla 15

Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 10 segundos).

Parámetro	UASB	H ₂ O ₂ 112 mg/l	H ₂ O ₂ 170 mg/l	H ₂ O ₂ 300 mg/l	Filtro de arena	H ₂ O ₂ 10 mg/l	H ₂ O ₂ 30 mg/l	H ₂ O ₂ 50 mg/l
pH	7.48 ± 0.12	7.71 ± 0.13	7.72 ± 0.11	7.57 ± 0.12	7.79 ± 0.16	7.85 ± 0.13	7.79 ± 0.17	7.72 ± 0.23
Temperatura (°C)	18.19 ± 0.61	17.98 ± 0.63	18.06 ± 0.64	18.09 ± 0.64	17.47 ± 0.87	17.59 ± 0.77	17.52 ± 0.83	17.55 ± 0.82
Turbiedad (NTU)	64.14 ± 24.87	235.87 ± 93.93	223.97 ± 93.95	192.69 ± 83.25	8.94 ± 8.19	11.58 ± 12.03	8.87 ± 8.51	8.74 ± 8.07
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.34 ± 0.23	2.64 ± 0.87	4.62 ± 1.58	7.71 ± 2.58	8.74 ± 0.53	8.91 ± 0.63	9.13 ± 0.63	9.40 ± 0.77
Conductividad (uS/cm)	1241.00 ± 75.31	1227.32 ± 75.75	1229.74 ± 74.62	1219.58 ± 73.85	1393.58 ± 89.14	1394.26 ± 85.94	1391.58 ± 87.11	1389.05 ± 88.12
Transmitancia (%)	6.27 ± 1.72	3.43 ± 1.85	3.35 ± 1.88	3.32 ± 1.60	70.59 ± 10.16	69.41 ± 9.16	68.35 ± 8.83	65.08 ± 8.79
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	3.46E+06 ± 2.22E+06	1.47E+05 ± 8.62E+04	2.84E+05 ± 3.59E+05	3.73E+05 ± 3.41E+05	1.51E+06 ± 1.02E+06	2.08E+04 ± 1.53E+04	5.98E+03 ± 5.21E+03	2.49E+03 ± 2.42E+03
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	45.25 ± 9.32	42.25 ± 8.26	35.25 ± 6.40	38.25 ± 7.14	4.30 ± 0.68	4.60 ± 1.06	5.00 ± 1.06	5.30 ± 1.40
Peróxido de hidrógeno residual (mg/l)	-	75.00 ± 28.87	125.00 ± 28.87	150.00 ± 0.00	-	5.00 ± 0.00	25.00 ± 0.00	30.00 ± 0.00

Tabla 16

Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 20 segundos).

Parámetro	UASB	H ₂ O ₂ 112 mg/l	H ₂ O ₂ 170 mg/l	H ₂ O ₂ 300 mg/l	Filtro de arena	H ₂ O ₂ 10 mg/l	H ₂ O ₂ 30 mg/l	H ₂ O ₂ 50 mg/l
pH	7.28 ± 0.14	7.57 ± 0.14	7.62 ± 0.18	7.41 ± 0.13	7.55 ± 0.19	7.61 ± 0.22	7.53 ± 0.21	7.50 ± 0.21
Temperatura (°C)	18.97 ± 0.89	18.76 ± 0.92	18.88 ± 0.94	18.96 ± 0.93	18.43 ± 1.08	18.52 ± 1.07	18.51 ± 1.07	18.58 ± 1.08
Turbiedad (NTU)	57.51 ± 44.60	224.42 ± 62.16	205.01 ± 53.52	176.79 ± 46.07	5.73 ± 3.25	5.52 ± 3.19	5.43 ± 3.48	5.49 ± 3.25
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.52 ± 0.57	2.26 ± 1.28	3.73 ± 1.59	6.93 ± 2.39	8.03 ± 1.24	8.15 ± 1.25	8.38 ± 1.30	8.61 ± 1.33
Conductividad (uS/cm)	1198.44 ± 20.30	1178.38 ± 22.57	1188.13 ± 22.73	1180.25 ± 21.38	1441.88 ± 39.93	1442.00 ± 41.00	1438.94 ± 39.89	1436.94 ± 41.77
Transmitancia (%)	6.89 ± 2.73	3.61 ± 2.07	3.52 ± 2.17	3.27 ± 1.74	69.84 ± 9.89	68.84 ± 9.80	67.98 ± 10.07	66.11 ± 10.35
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	5.81E+06 ± 6.80E+06	2.65E+05 ± 3.68E+05	2.48E+05 ± 3.78E+05	4.53E+05 ± 4.26E+05	3.16E+06 ± 4.83E+06	1.94E+04 ± 2.35E+04	2.95E+03 ± 4.93E+03	1.83E+03 ± 2.38E+03
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	42.75 ± 5.44	36.50 ± 4.93	40.50 ± 5.97	36.75 ± 4.11	5.80 ± 2.18	7.40 ± 3.14	6.80 ± 2.38	6.30 ± 2.56
Peróxido de hidrógeno residual (mg/l)	-	82.50 ± 35.00	137.50 ± 25.00	150.00 ± 0.00	-	5.00 ± 0.00	25.00 ± 0.00	30.00 ± 0.00

Tabla 17

Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 30 segundos).

Parámetro	UASB	H ₂ O ₂ 112 mg/l	H ₂ O ₂ 170 mg/l	H ₂ O ₂ 300 mg/l	Filtro de arena	H ₂ O ₂ 10 mg/l	H ₂ O ₂ 30 mg/l	H ₂ O ₂ 50 mg/l
pH	7.34 ± 0.22	7.49 ± 0.25	7.49 ± 0.28	7.31 ± 0.24	7.66 ± 0.19	7.71 ± 0.24	7.64 ± 0.21	7.61 ± 0.18
Temperatura (°C)	18.32 ± 0.49	18.11 ± 0.32	18.23 ± 0.36	18.38 ± 0.35	17.68 ± 0.66	17.82 ± 0.65	17.78 ± 0.72	17.76 ± 0.67
Turbiedad (NTU)	51.03 ± 7.32	185.68 ± 50.23	168.72 ± 49.86	142.51 ± 43.60	6.97 ± 4.03	6.53 ± 3.10	6.32 ± 3.42	6.62 ± 3.12
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.59 ± 0.70	2.83 ± 1.12	5.12 ± 1.76	8.63 ± 1.69	8.21 ± 0.79	8.32 ± 0.72	8.67 ± 0.84	8.89 ± 0.91
Conductividad (uS/cm)	1197.26 ± 29.45	1190.26 ± 34.43	1188.05 ± 31.24	1184.53 ± 30.85	1420.21 ± 46.00	1422.21 ± 51.18	1419.63 ± 46.56	1415.11 ± 47.30
Transmitancia (%)	7.72 ± 2.89	4.40 ± 2.94	4.50 ± 3.14	4.27 ± 3.56	71.23 ± 8.45	70.68 ± 8.42	68.67 ± 8.57	65.53 ± 8.54
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	3.74E+06 ± 2.56E+06	5.38E+04 ± 8.03E+04	8.33E+04 ± 1.55E+05	1.72E+04 ± 1.39E+04	1.49E+06 ± 9.40E+05	1.60E+03 ± 1.29E+03	9.78E+02 ± 6.37E+02	4.89E+02 ± 3.04E+02
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	43.25 ± 8.06	33.50 ± 9.88	36.75 ± 6.08	33.50 ± 10.47	4.90 ± 1.24	6.40 ± 0.46	7.30 ± 1.32	6.00 ± 0.86
Peróxido de hidrógeno residual (mg/l)	-	45.00 ± 10.00	100.00 ± 0.00	137.50 ± 25.00	-	5.00 ± 0.00	13.75 ± 7.50	30.00 ± 0.00

Tabla 18

Resumen de resultados (Tiempo de contacto UV de 60 segundos).

Parámetro	UASB	H ₂ O ₂ 112 mg/l	H ₂ O ₂ 170 mg/l	H ₂ O ₂ 300 mg/l	Filtro de arena	H ₂ O ₂ 10 mg/l	H ₂ O ₂ 30 mg/l	H ₂ O ₂ 50 mg/l
pH	7.62 ± 0.26	7.86 ± 0.23	7.86 ± 0.23	7.69 ± 0.22	8.11 ± 0.24	8.18 ± 0.31	8.03 ± 0.23	7.99 ± 0.21
Temperatura (°C)	20.63 ± 1.26	20.47 ± 1.27	20.58 ± 1.32	20.62 ± 1.32	19.96 ± 1.41	20.09 ± 1.49	20.03 ± 1.46	20.09 ± 1.42
Turbiedad (NTU)	53.33 ± 21.23	223.71 ± 65.43	199.33 ± 56.12	168.70 ± 50.15	10.64 ± 7.69	9.03 ± 5.53	8.95 ± 6.09	8.66 ± 6.19
Oxígeno disuelto (mg/l)	0.25 ± 0.25	4.64 ± 3.59	7.42 ± 4.04	12.60 ± 4.38	8.09 ± 0.57	8.23 ± 0.73	8.68 ± 1.03	9.03 ± 1.49
Conductividad (uS/cm)	1220.94 ± 23.09	1209.94 ± 36.11	1205.06 ± 24.18	1200.06 ± 21.60	1425.56 ± 35.29	1425.11 ± 38.74	1421.22 ± 35.83	1422.78 ± 34.23
Transmitancia (%)	6.76 ± 2.75	3.23 ± 2.42	3.04 ± 2.33	2.87 ± 2.16	67.17 ± 5.45	68.20 ± 5.71	66.83 ± 5.57	65.12 ± 5.50
Coliformes termotolerantes (NMP/100ml)	4.40E+06 ± 2.80E+06	6.29E+03 ± 7.16E+03	7.66E+03 ± 7.69E+03	3.09E+03 ± 2.18E+03	1.16E+06 ± 6.74E+05	3.00E+02 ± 2.27E+02	4.04E+02 ± 3.03E+02	6.78E+02 ± 7.76E+02
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	42.50 ± 10.02	31.50 ± 7.59	29.75 ± 3.10	33.00 ± 5.72	5.10 ± 0.89	5.20 ± 0.57	6.10 ± 0.82	4.60 ± 1.77
Peróxido de hidrógeno residual (mg/l)	-	30.00 ± 0.00	50.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-	2.00 ± 0.82	8.75 ± 2.50	26.25 ± 2.50

4.3 pH y temperatura

4.3.1 Configuración N°01

Tabla 19

Resultados del rango del pH y temperatura-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de pH	Rango de Temperatura (°C)
10 segundos	-	7.32 - 7.72	17.5 - 19.8
	112	7.55 - 8.02	17.4 - 19.9
	170	7.58 - 8.01	17.1 - 19.9
	300	7.42 - 7.81	17.3 - 19.9
20 segundos	-	7.06 - 7.48	17.6 - 20.4
	112	7.31 - 7.82	17.5 - 20.4
	170	7.32 - 8.02	17.5 - 20.6
	300	7.17 - 7.68	17.6 - 20.6
30 segundos	-	6.85 - 7.67	17.5 - 19.2
	112	7.17 - 7.95	17.7 - 18.7
	170	7.08 - 8.01	17.7 - 18.8
	300	6.95 - 7.72	17.8 - 19.0
60 segundos	-	7.09 - 8.11	18.8 - 22.9
	112	7.47 - 8.42	18.7 - 22.6
	170	7.49 - 8.44	18.7 - 23.0
	300	7.30 - 8.19	18.7 - 23.0

4.3.2 Configuración N°02

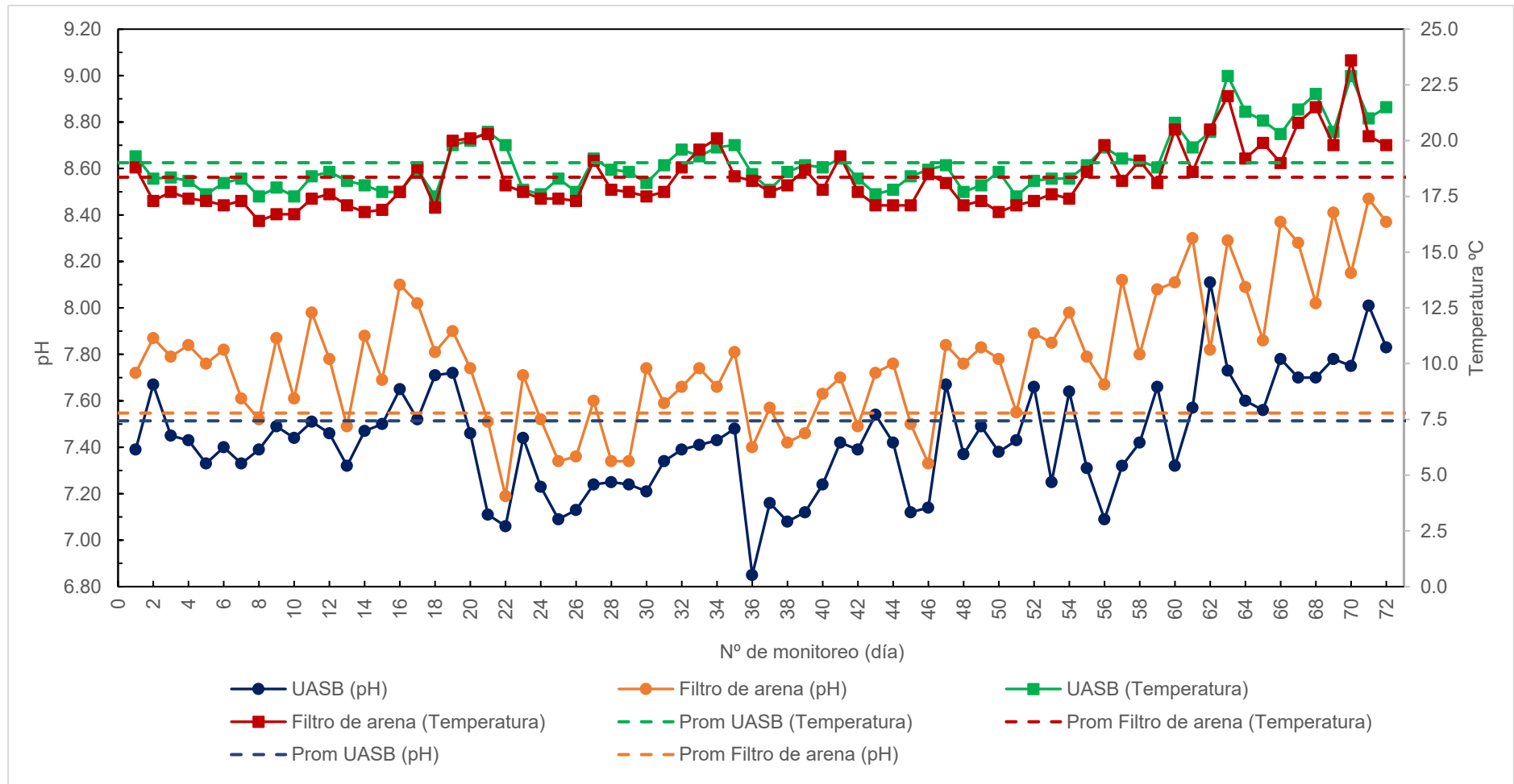
Tabla 20

Resultados del rango del pH y temperatura-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de pH	Rango de Temperatura (°C)
10 segundos	-	7.49 - 8.10	16.4 - 20.0
	10	7.58 - 8.17	16.8 - 20.1
	30	7.40 - 8.12	16.5 - 20.2
	50	7.21 - 8.08	16.6 - 20.2
20 segundos	-	7.19 - 7.81	17.3 - 20.3
	10	7.20 - 7.91	17.4 - 20.4
	30	7.15 - 7.84	17.4 - 20.3
	50	7.10 - 7.84	17.4 - 20.5
30 segundos	-	7.33 - 7.98	16.8 - 19.3
	10	7.27 - 8.10	17.0 - 19.5
	30	7.22 - 7.97	17.0 - 19.7
	50	7.30 - 7.89	17.0 - 19.6
60 segundos	-	7.67 - 8.47	18.1 - 23.6
	10	7.81 - 8.90	18.4 - 23.4
	30	7.70 - 8.46	18.2 - 23.5
	50	7.68 - 8.37	18.2 - 23.5

Figura 18

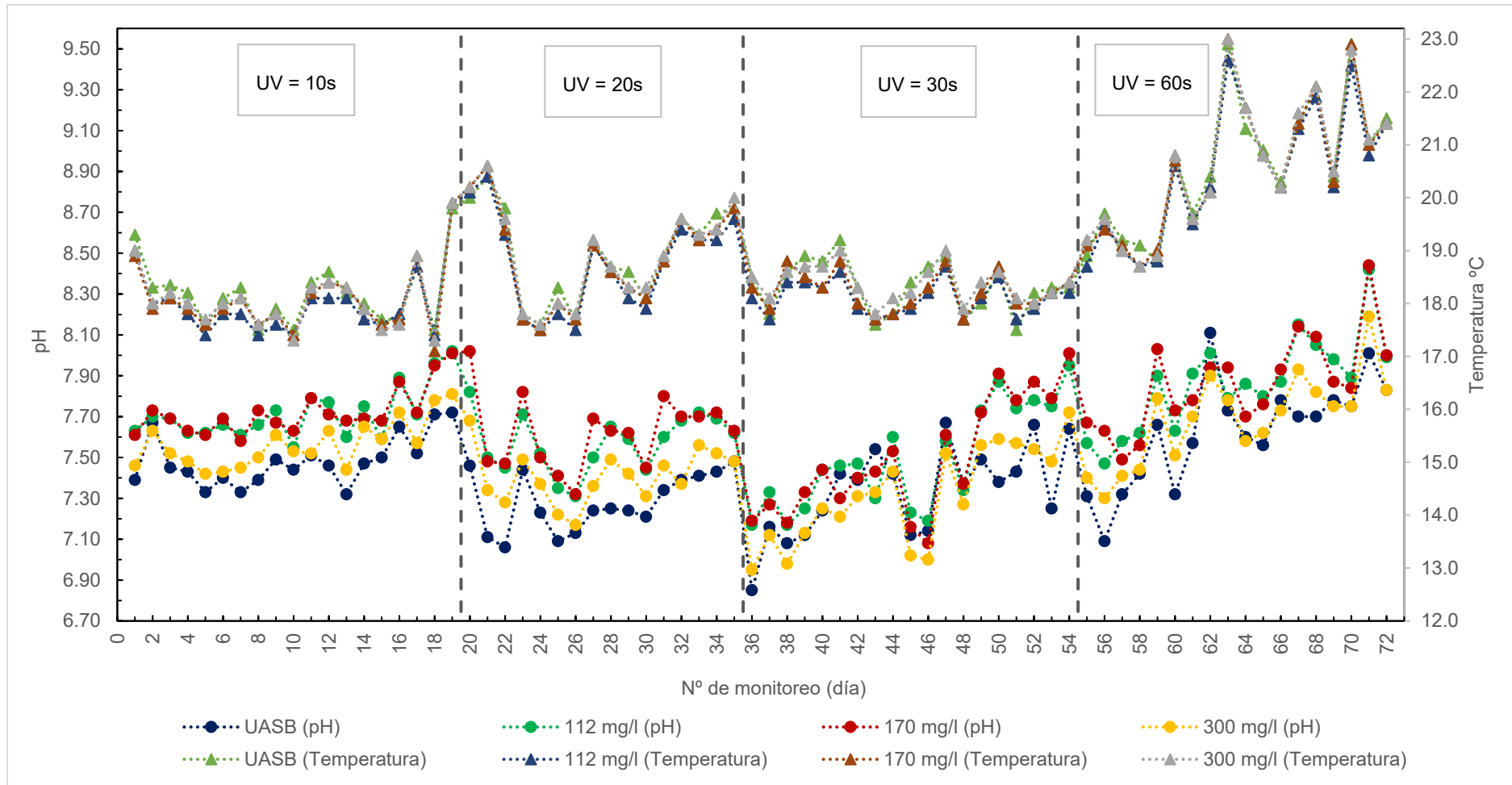
pH y temperatura del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 19

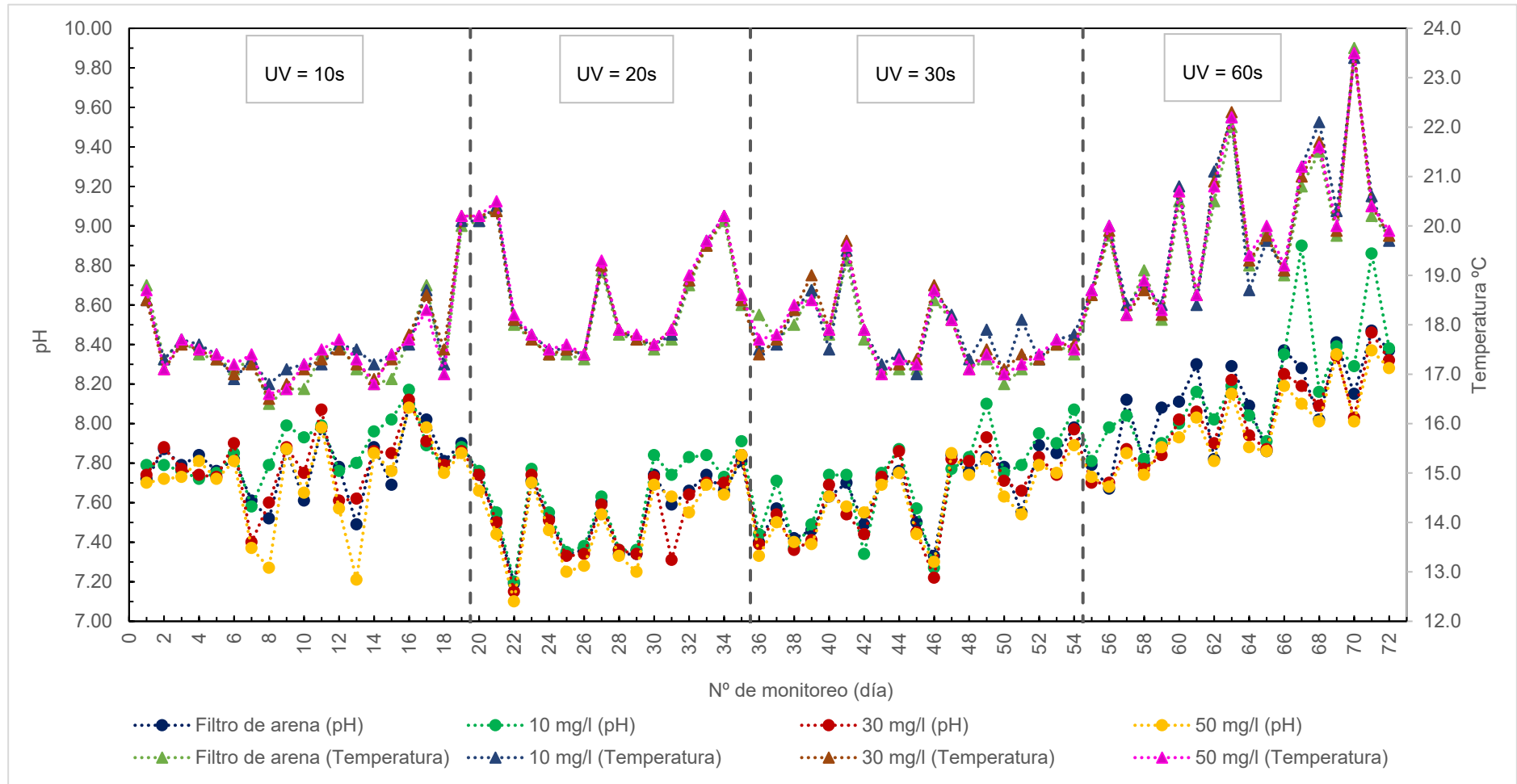
pH y temperatura Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 20

pH y temperatura Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

4.4 Turbiedad

4.4.1 Configuración N°01

Tabla 21

Resultados del rango de turbiedad-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Turbiedad (NTU)
10 segundos	-	26.60 - 124.00
	112	84.40 - 438.00
	170	87.60 - 437.00
	300	76.00 - 382.00
20 segundos	-	24.20 - 220.00
	112	157.00 - 358.00
	170	149.00 - 320.00
	300	125.00 - 283.00
30 segundos	-	32.70 - 60.40
	112	107.00 - 308.00
	170	98.00 - 285.00
	300	79.00 - 244.00
60 segundos	-	30.50 - 129.00
	112	95.80 - 310.00
	170	80.00 - 281.00
	300	69.50 - 252.00

4.4.2 Configuración N°02

Tabla 22

Resultados del rango de turbiedad-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Turbiedad (NTU)
10 segundos	-	1.34 - 35.40
	10	2.70 - 48.40
	30	1.38 - 35.70
	50	1.97 - 34.50
20 segundos	-	1.53 - 11.90
	10	1.47 - 11.50
	30	1.14 - 14.40
	50	1.31 - 13.20
30 segundos	-	2.06 - 14.10
	10	2.35 - 11.60
	30	2.10 - 15.70
	50	2.47 - 12.60
60 segundos	-	3.09 - 35.20
	10	2.78 - 28.20
	30	2.60 - 29.40
	50	2.56 - 29.60

Figura 21

Turbiedad del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.

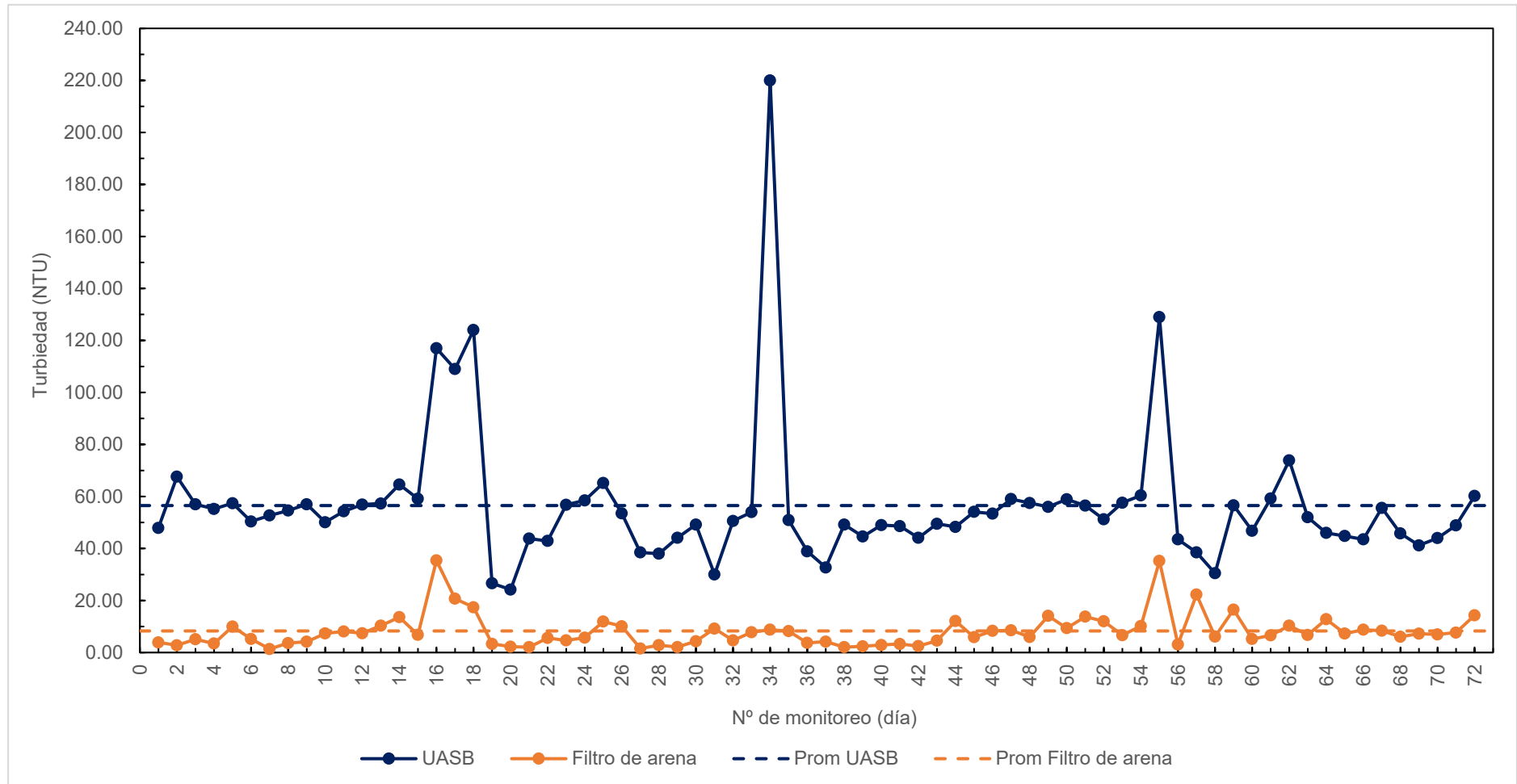
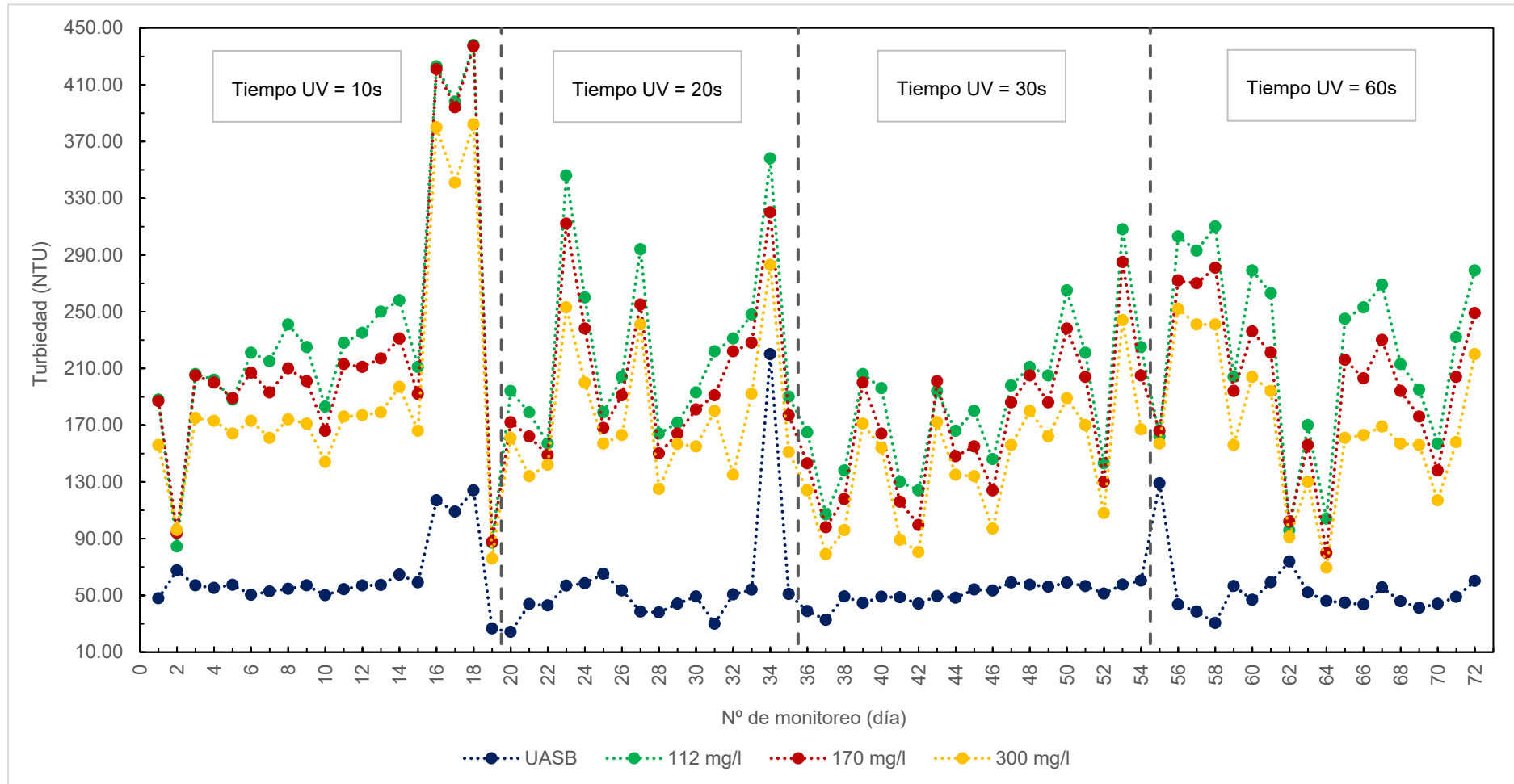


Figura 22

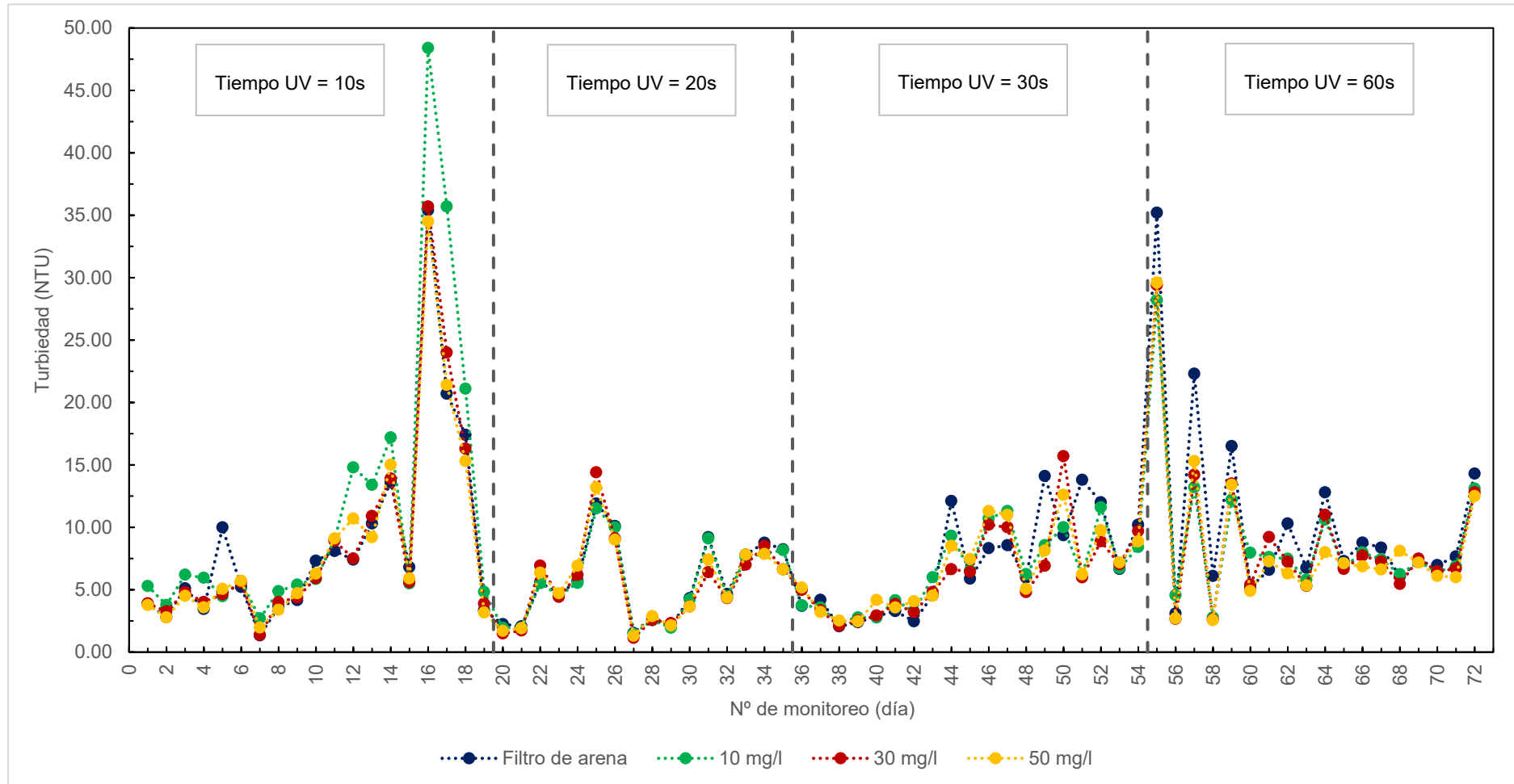
Turbiedad Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂ O₂

Figura 23

Turbiedad Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

4.5 Oxígeno disuelto

4.5.1 Configuración N°01

Tabla 23

Resultados del rango del oxígeno disuelto-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Oxígeno disuelto (mg/l)
10 segundos	-	0.15 - 1.08
	112	1.26 - 4.17
	170	2.39 - 8.26
	300	4.39 - 14.65
20 segundos	-	0.13 - 2.48
	112	1.19 - 6.39
	170	1.94 - 8.85
	300	3.80 - 13.80
30 segundos	-	0.12 - 2.76
	112	0.87 - 6.08
	170	1.75 - 9.65
	300	4.18 - 11.47
60 segundos	-	0.07 - 0.98
	112	1.68 - 16.32
	170	2.20 - 18.44
	300	7.29 - 21.89

4.5.2 Configuración N°02

Tabla 24

Resultados del rango del oxígeno disuelto-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de OD (mg/l)
10 segundos	-	7.58 - 9.61
	10	7.44 - 9.90
	30	7.74 - 10.22
	50	8.00 - 11.12
20 segundos	-	5.39 - 9.40
	10	5.47 - 9.50
	30	5.60 - 9.74
	50	5.77 - 10.12
30 segundos	-	6.76 - 9.26
	10	7.26 - 9.59
	30	7.08 - 10.44
	50	7.27 - 11.12
60 segundos	-	6.52 - 8.93
	10	6.45 - 9.90
	30	6.89 - 11.56
	50	7.14 - 13.90

Figura 24

OD del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de monitoreo.

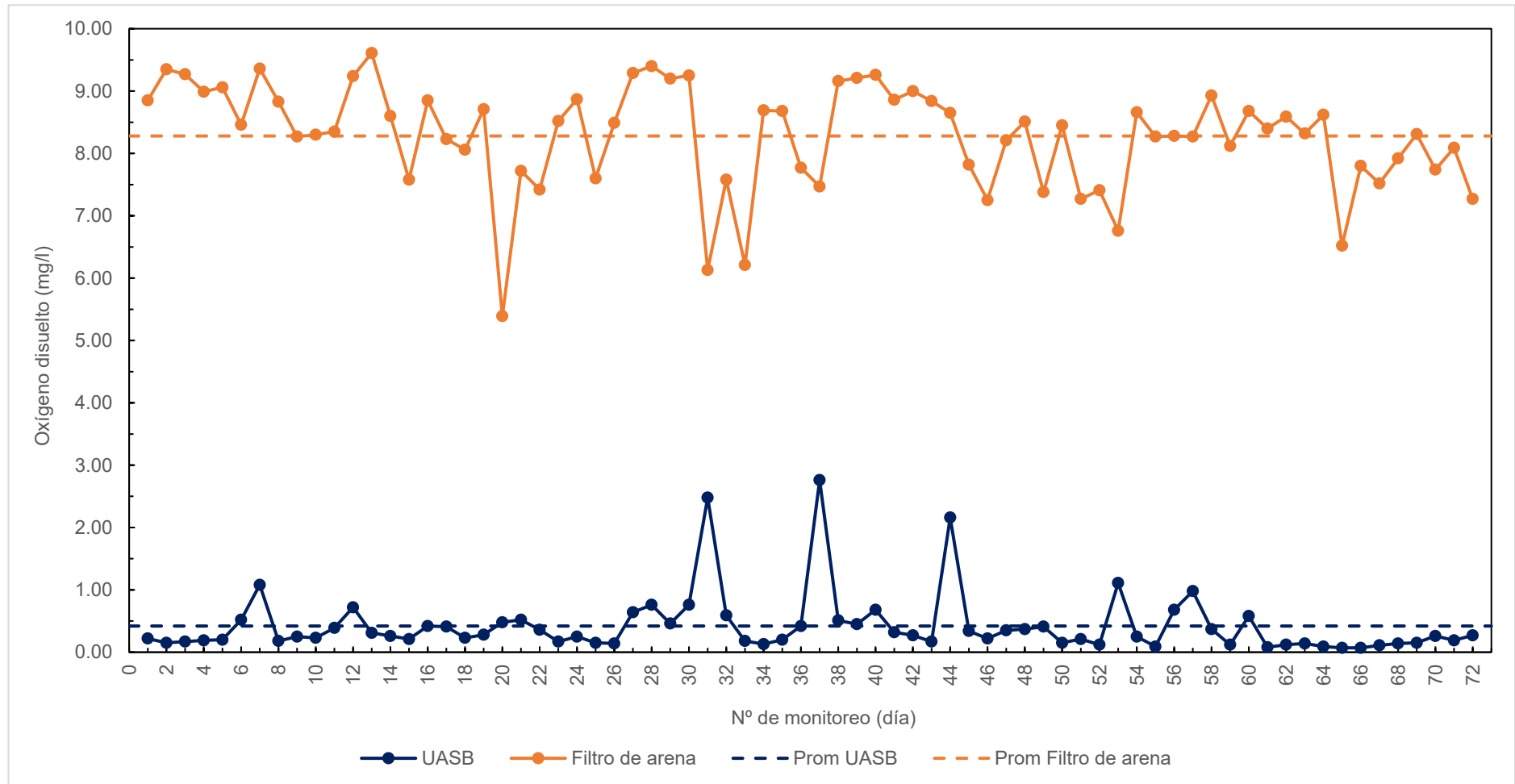
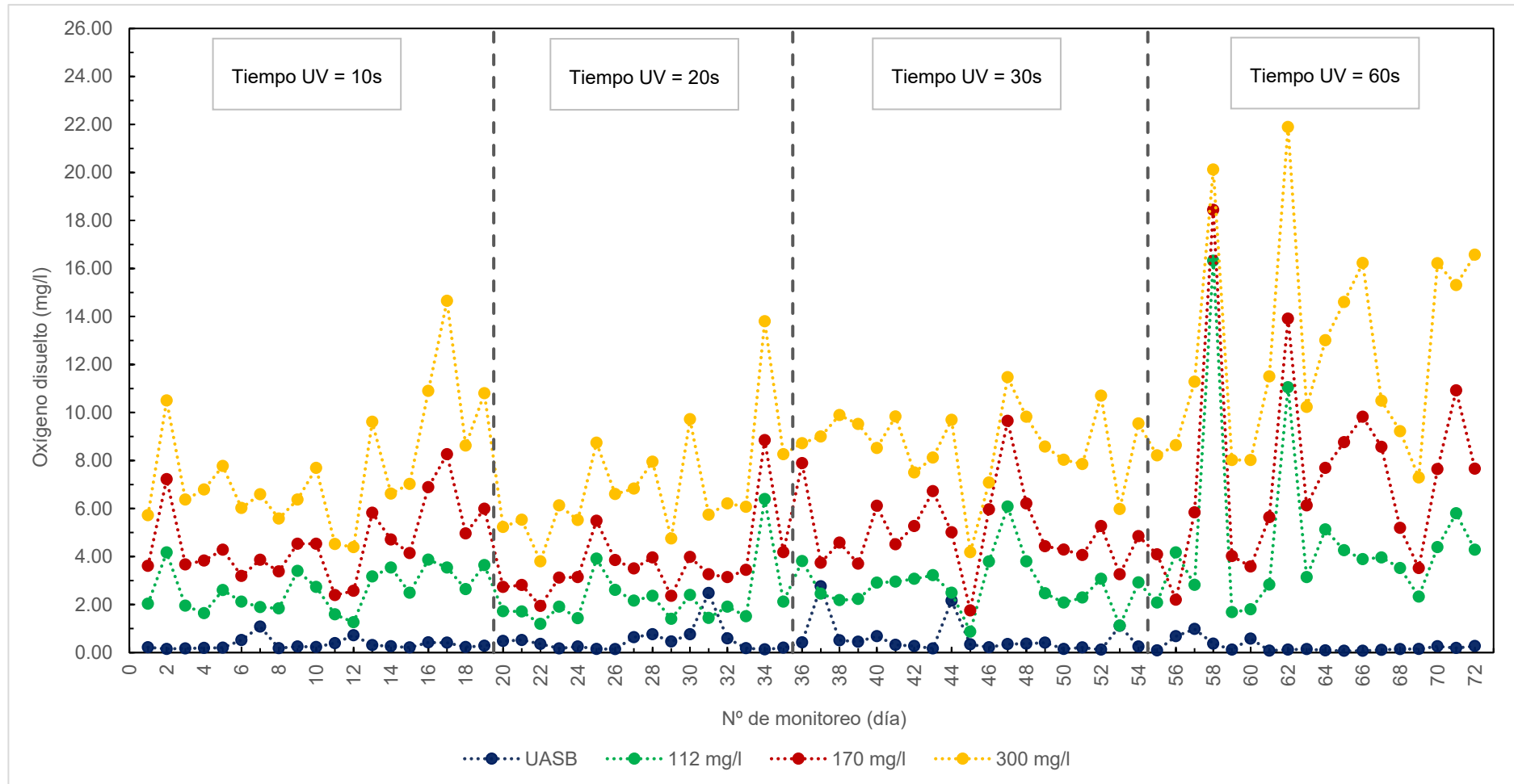


Figura 25

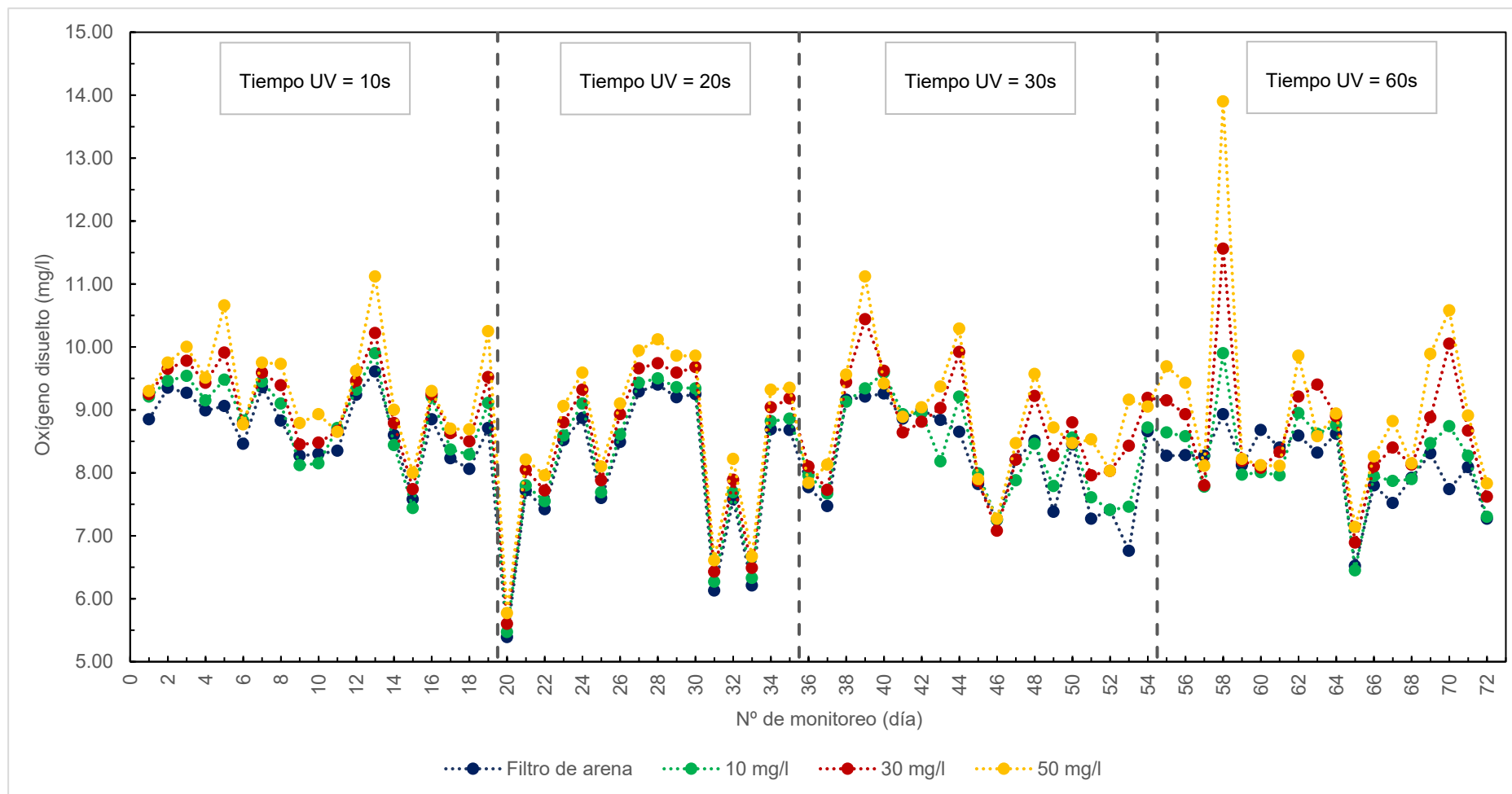
Oxígeno disuelto Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 26

Oxígeno disuelto Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H_2O_2

4.6 Conductividad

4.6.1 Configuración N°01

Tabla 25

Resultados del rango de conductividad-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Conductividad (uS/cm)
10 segundos	-	976.00 - 1304.00
	112	963.00 - 1291.00
	170	975.00 - 1292.00
	300	965.00 - 1282.00
20 segundos	-	1148.00 - 1228.00
	112	1142.00 - 1232.00
	170	1151.00 - 1238.00
	300	1144.00 - 1228.00
30 segundos	-	1114.00 - 1246.00
	112	1093.00 - 1231.00
	170	1101.00 - 1237.00
	300	1095.00 - 1222.00
60 segundos	-	1164.00 - 1264.00
	112	1140.00 - 1315.00
	170	1141.00 - 1238.00
	300	1136.00 - 1227.00

4.6.2 Configuración N°02

Tabla 26

Resultados del rango de conductividad-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Conductividad (uS/cm)
10 segundos	-	1080.00 - 1483.00
	10	1096.00 - 1479.00
	30	1091.00 - 1480.00
	50	1083.00 - 1472.00
20 segundos	-	1380.00 - 1522.00
	10	1379.00 - 1528.00
	30	1379.00 - 1520.00
	50	1369.00 - 1519.00
30 segundos	-	1317.00 - 1514.00
	10	1309.00 - 1526.00
	30	1304.00 - 1505.00
	50	1313.00 - 1517.00
60 segundos	-	1325.00 - 1499.00
	10	1324.00 - 1527.00
	30	1323.00 - 1521.00
	50	1323.00 - 1511.00

Figura 27

Conductividad del reactor UASB y del Filtro Vs N° de monitoreo.

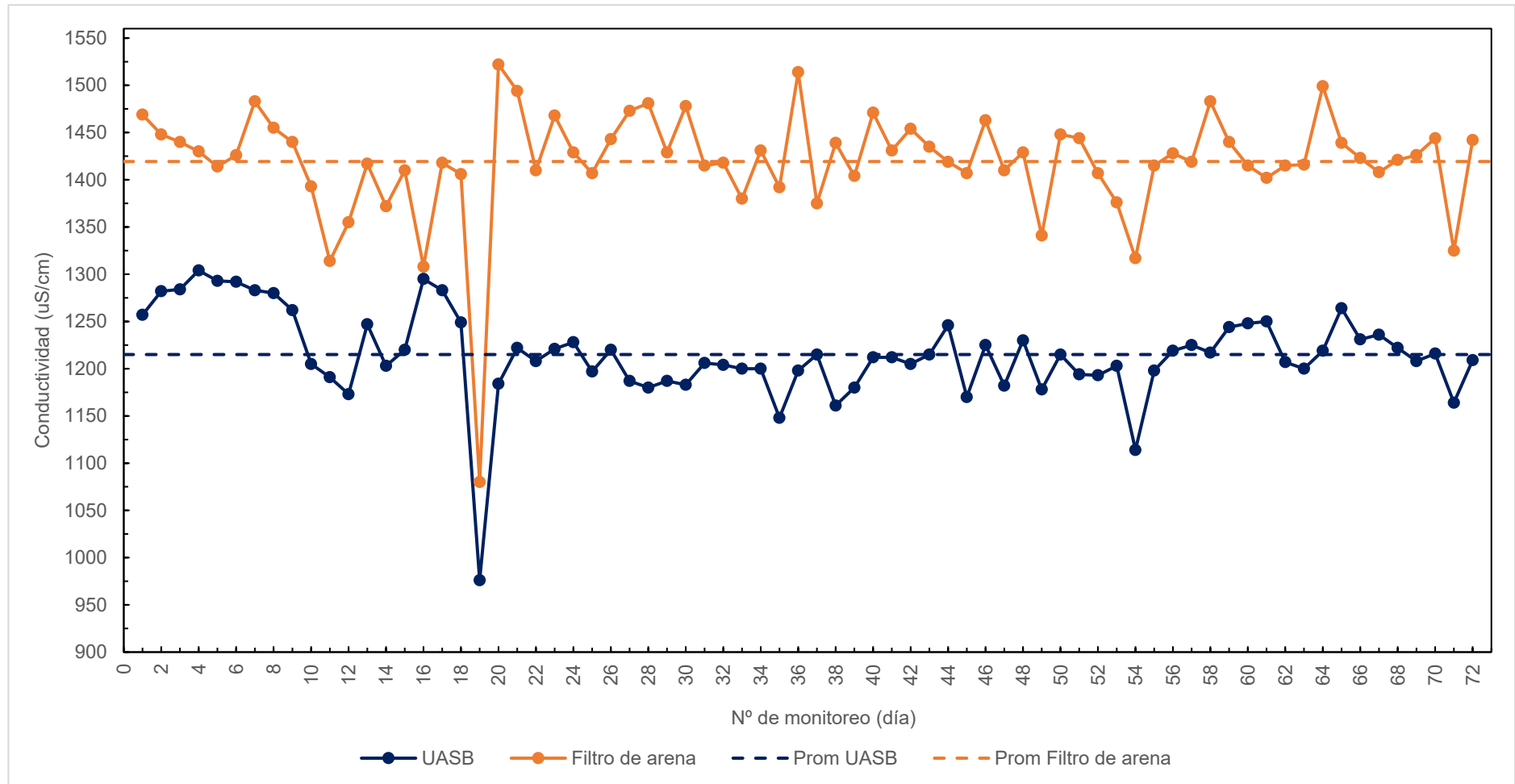
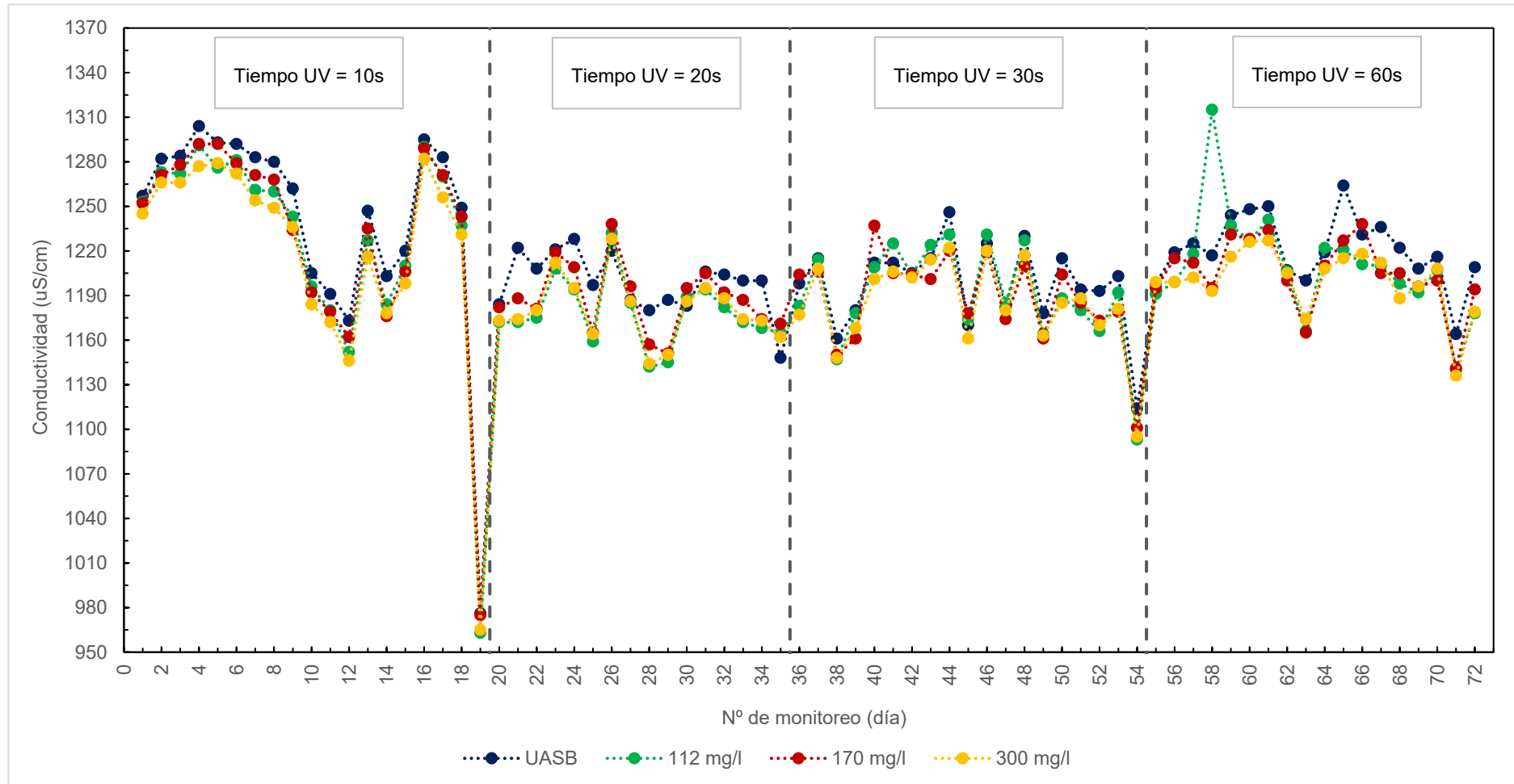


Figura 28

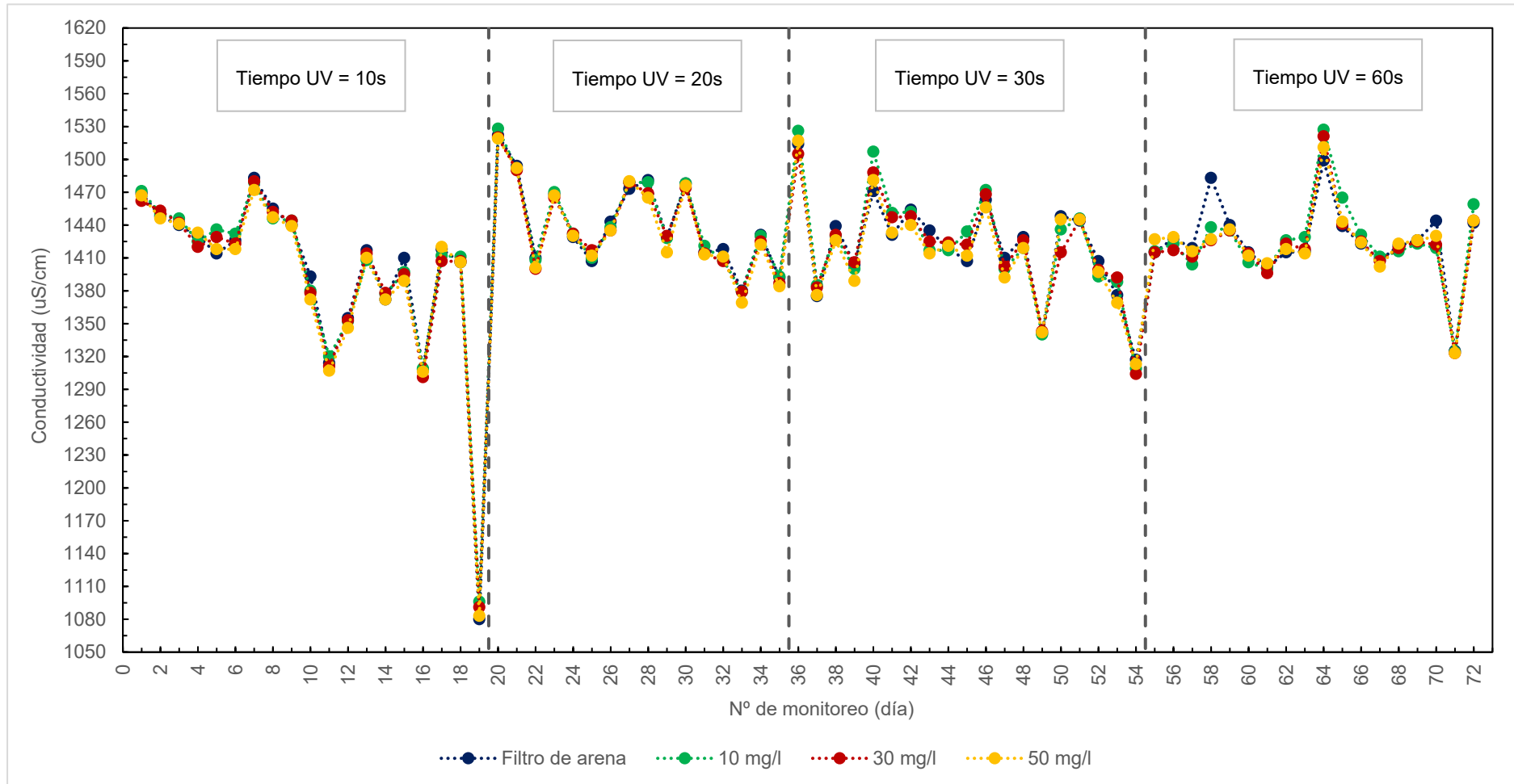
Conductividad Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 29

Conductividad Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H_2O_2

4.7 Transmitancia

4.7.1 Configuración N°01

Tabla 27

Resultados del rango de transmitancia-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Transmitancia (%)
10 segundos	-	4.03 - 9.62
	112	1.73 - 10.20
	170	1.62 - 9.89
	300	1.57 - 8.74
20 segundos	-	4.07 - 12.99
	112	1.25 - 7.81
	170	1.21 - 8.09
	300	1.43 - 6.57
30 segundos	-	4.59 - 14.96
	112	1.39 - 12.18
	170	1.25 - 12.68
	300	1.24 - 13.37
60 segundos	-	3.46 - 11.83
	112	0.84 - 10.81
	170	0.77 - 10.59
	300	0.79 - 9.60

4.7.2 Configuración N°02

Tabla 28

Resultados del rango de transmitancia-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de Transmitancia (%)
10 segundos	-	52.89 - 89.37
	10	52.75 - 87.64
	30	52.02 - 85.96
	50	48.70 - 81.25
20 segundos	-	57.00 - 90.84
	10	53.93 - 89.87
	30	52.59 - 89.76
	50	50.96 - 87.62
30 segundos	-	59.55 - 84.68
	10	56.05 - 83.66
	30	53.93 - 82.13
	50	49.95 - 80.28
60 segundos	-	61.29 - 79.98
	10	61.56 - 81.90
	30	59.44 - 79.67
	50	56.48 - 76.59

Figura 30

Transmitancia del reactor UASB y del Filtro Vs N° de monitoreo.

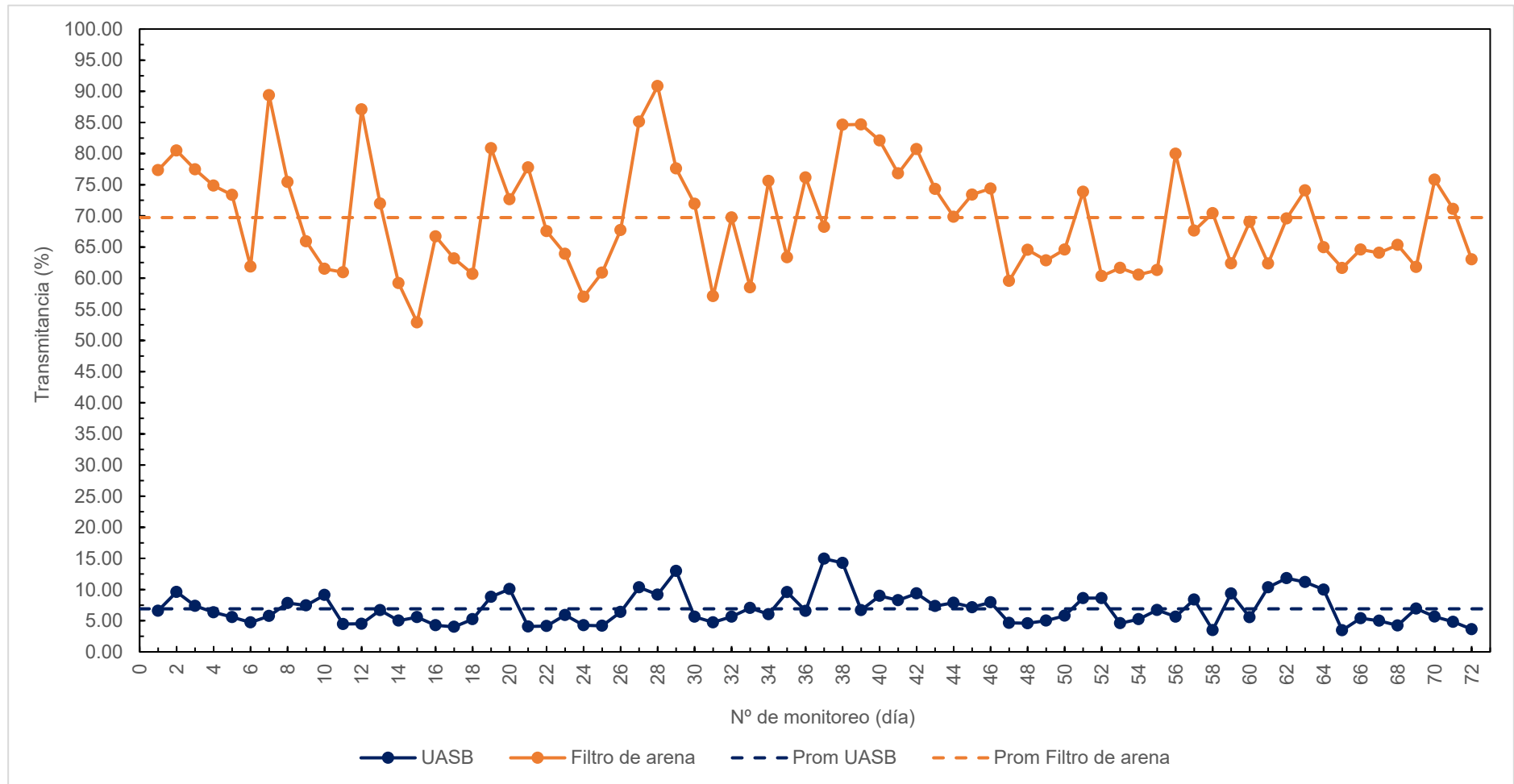
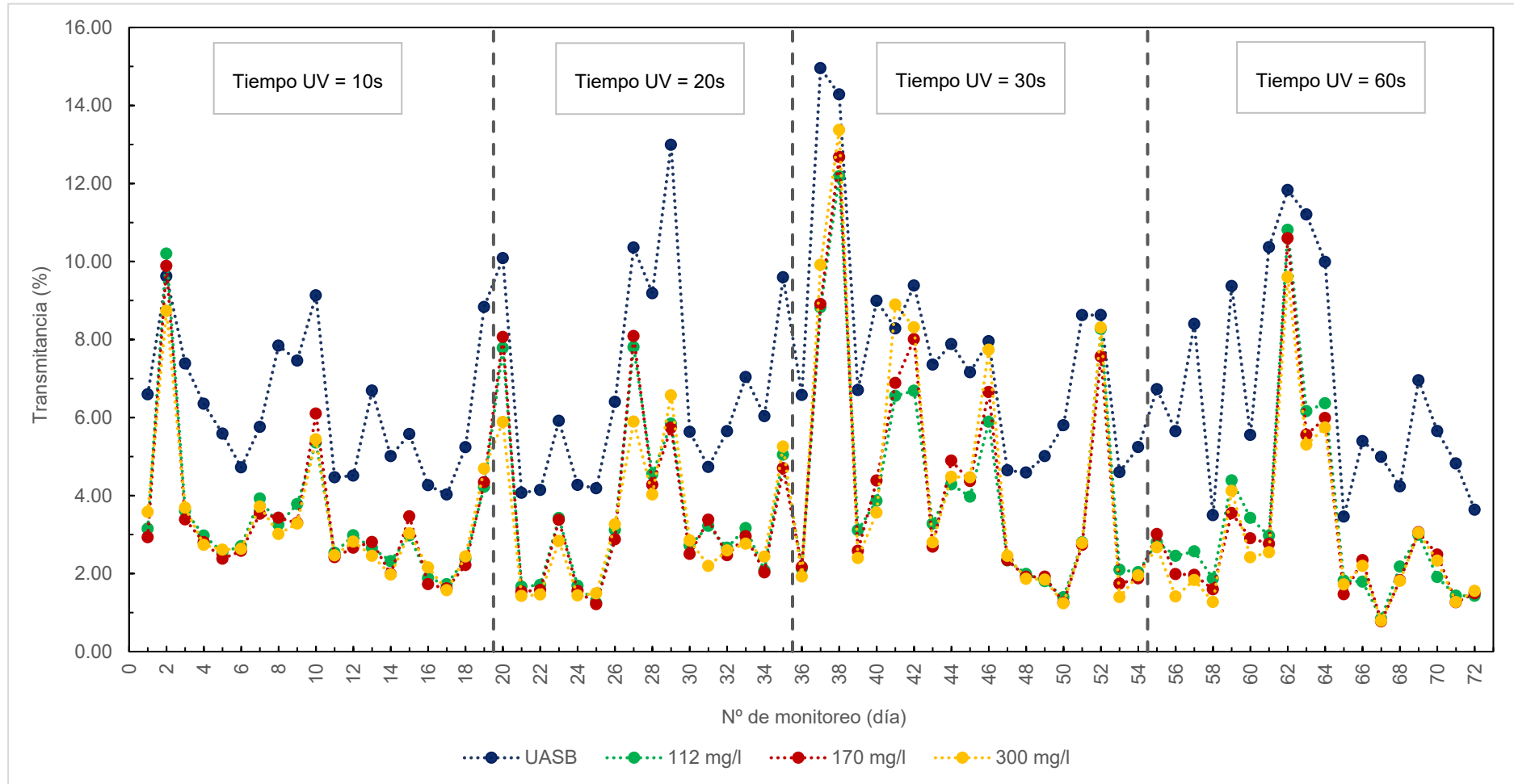


Figura 31

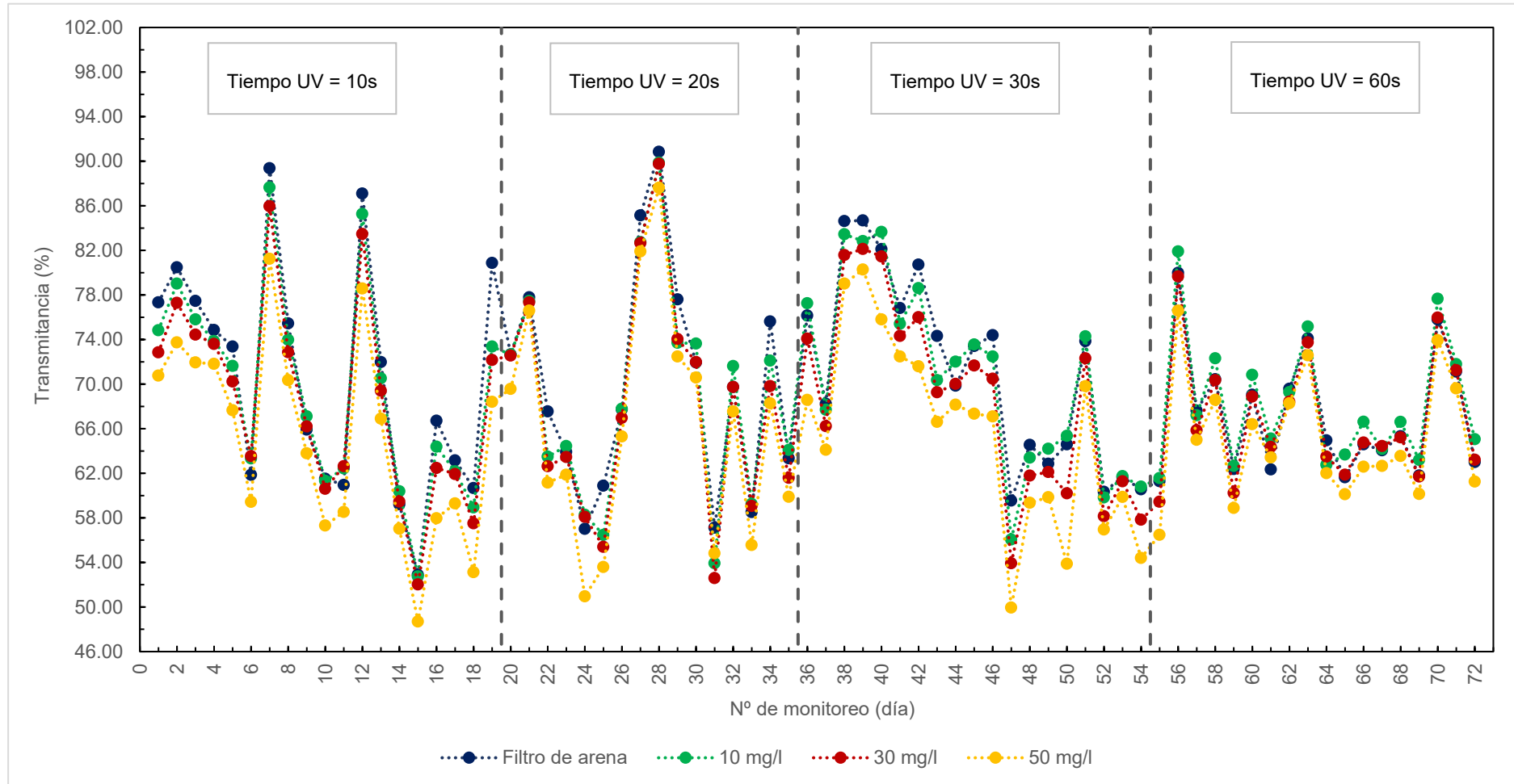
Transmitancia Vs N° de monitoreo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 32

Transmitancia Vs N° de monitoreo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de monitoreo están indicadas en mg/l de H₂O₂

4.8 Dosis media efectiva

Tabla 29

Dosis media efectivas promedio aplicadas.

Muestra	Tiempo de contacto UV	Dosis media efectiva promedio (mWs/cm2)
UASB	10 segundos	10.05 ± 0.91
	20 segundos	20.67 ± 2.76
	30 segundos	32.29 ± 4.14
	60 segundos	61.53 ± 8.56
Filtro de arena	10 segundos	32.41 ± 3.10
	20 segundos	64.36 ± 6.03
	30 segundos	97.82 ± 7.74
	60 segundos	188.25 ± 9.99

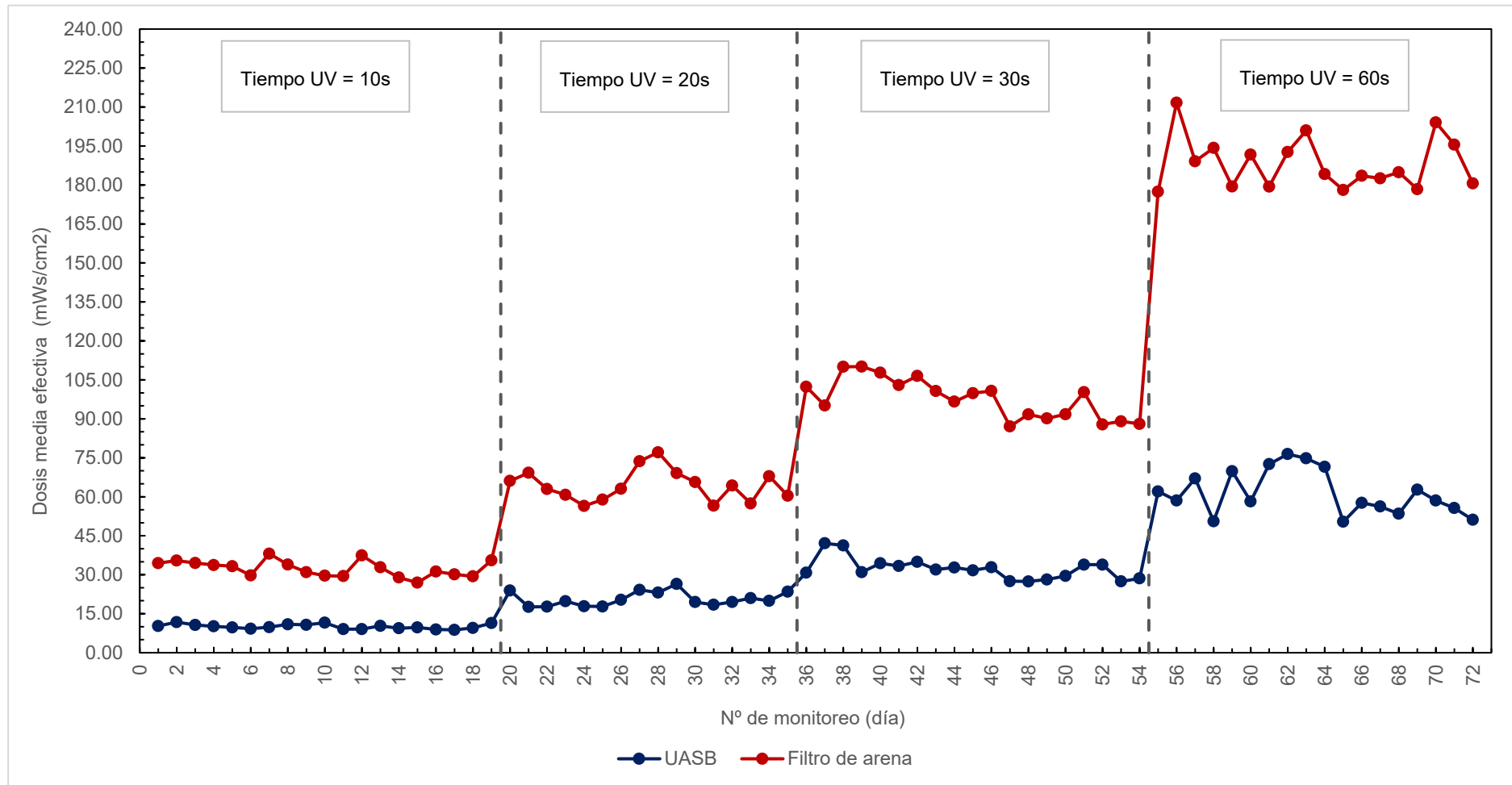
Tabla 30

Resultados del rango de las dosis media efectivas aplicadas.

Muestra	Tiempo de contacto UV	Rango de dosis media efectiva (mWs/cm2)
UASB	10 segundos	8.78 - 11.76
	20 segundos	17.62 - 26.46
	30 segundos	27.41 - 42.10
	60 segundos	50.40 - 76.43
Filtro de arena	10 segundos	26.96 - 38.11
	20 segundos	56.49 - 77.11
	30 segundos	87.10 - 110.10
	60 segundos	177.43 - 211.67

Figura 33

Dosis medias efectivas aplicadas a las muestras del reactor UASB y del Filtro de arena Vs N° de monitoreo.



4.9 Coliformes termotolerantes (C.T.)

4.9.1 Configuración N°01

Tabla 31

Resultados del rango de coliformes termotolerantes-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de coliformes termotolerantes (NMP/100ml)		
10 segundos	-	1.50E+06	-	7.50E+06
	112	3.00E+04	-	2.40E+05
	170	9.00E+03	-	1.10E+06
	300	4.60E+04	-	1.10E+06
20 segundos	-	9.00E+05	-	2.10E+07
	112	2.10E+04	-	1.10E+06
	170	1.10E+04	-	1.10E+06
	300	9.30E+04	-	1.10E+06
30 segundos	-	7.00E+05	-	9.30E+06
	112	7.00E+03	-	2.40E+05
	170	7.00E+03	-	4.60E+05
	300	2.30E+03	-	4.60E+04
60 segundos	-	9.00E+05	-	9.30E+06
	112	7.00E+02	-	2.30E+04
	170	9.00E+02	-	2.30E+04
	300	4.00E+02	-	7.50E+03

4.9.2 Configuración N°02

Tabla 32

Resultados del rango de coliformes termotolerantes-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de coliformes termotolerantes (NMP/100ml)		
10 segundos	-	4.00E+05	-	3.00E+06
	10	4.00E+03	-	4.00E+04
	30	4.00E+02	-	1.50E+04
	50	4.00E+02	-	7.00E+03
20 segundos	-	7.00E+05	-	1.50E+07
	10	4.00E+03	-	7.50E+04
	30	4.00E+02	-	1.50E+04
	50	3.00E+02	-	7.50E+03
30 segundos	-	4.00E+05	-	2.30E+06
	10	4.00E+02	-	4.00E+03
	30	2.30E+02	-	2.00E+03
	50	1.50E+02	-	9.00E+02
60 segundos	-	4.00E+05	-	2.30E+06
	10	4.00E+01	-	7.50E+02
	30	9.00E+01	-	9.30E+02
	50	4.00E+01	-	2.40E+03

Figura 34

Coliformes termotolerantes del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de ensayo.

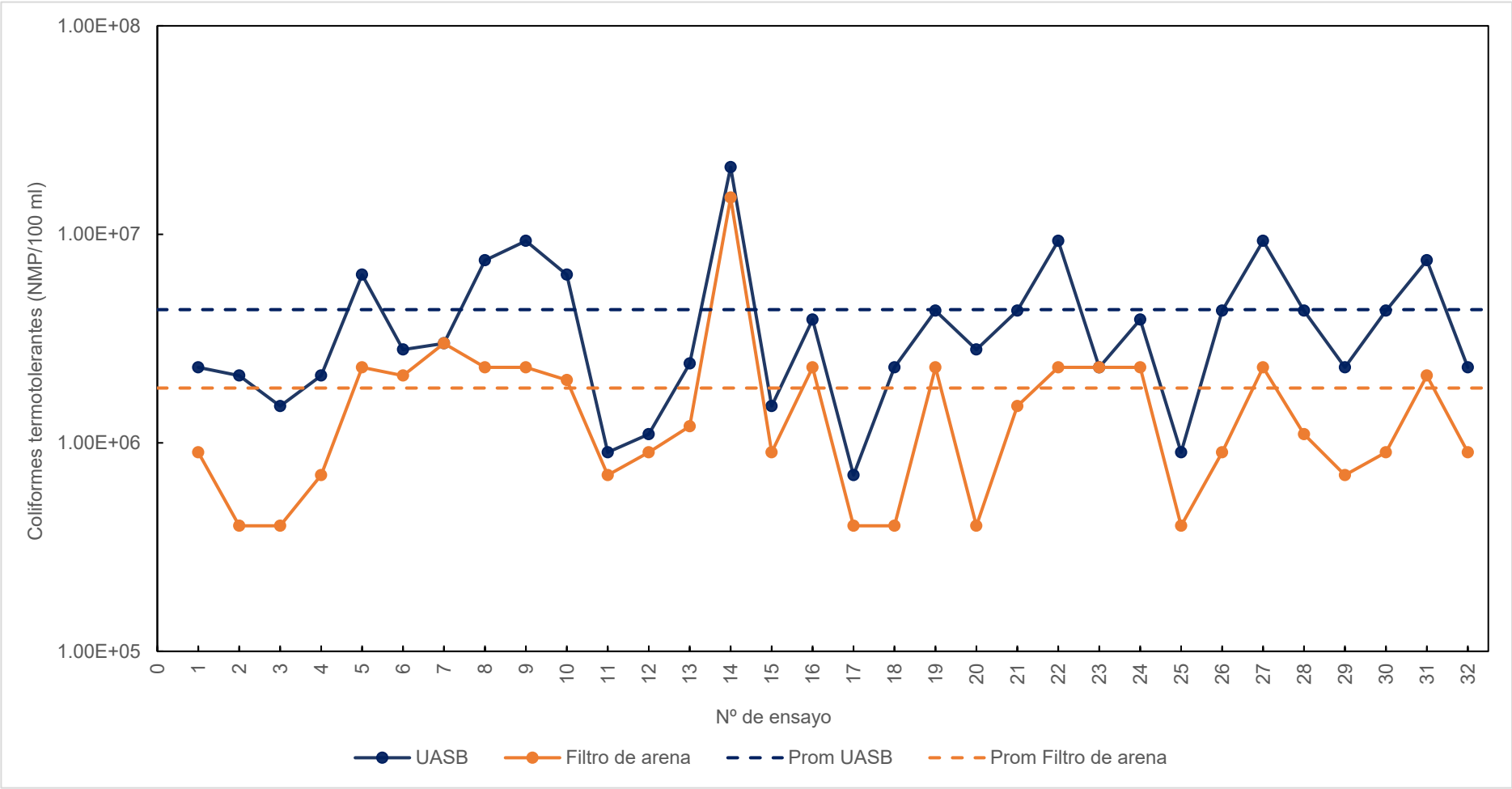
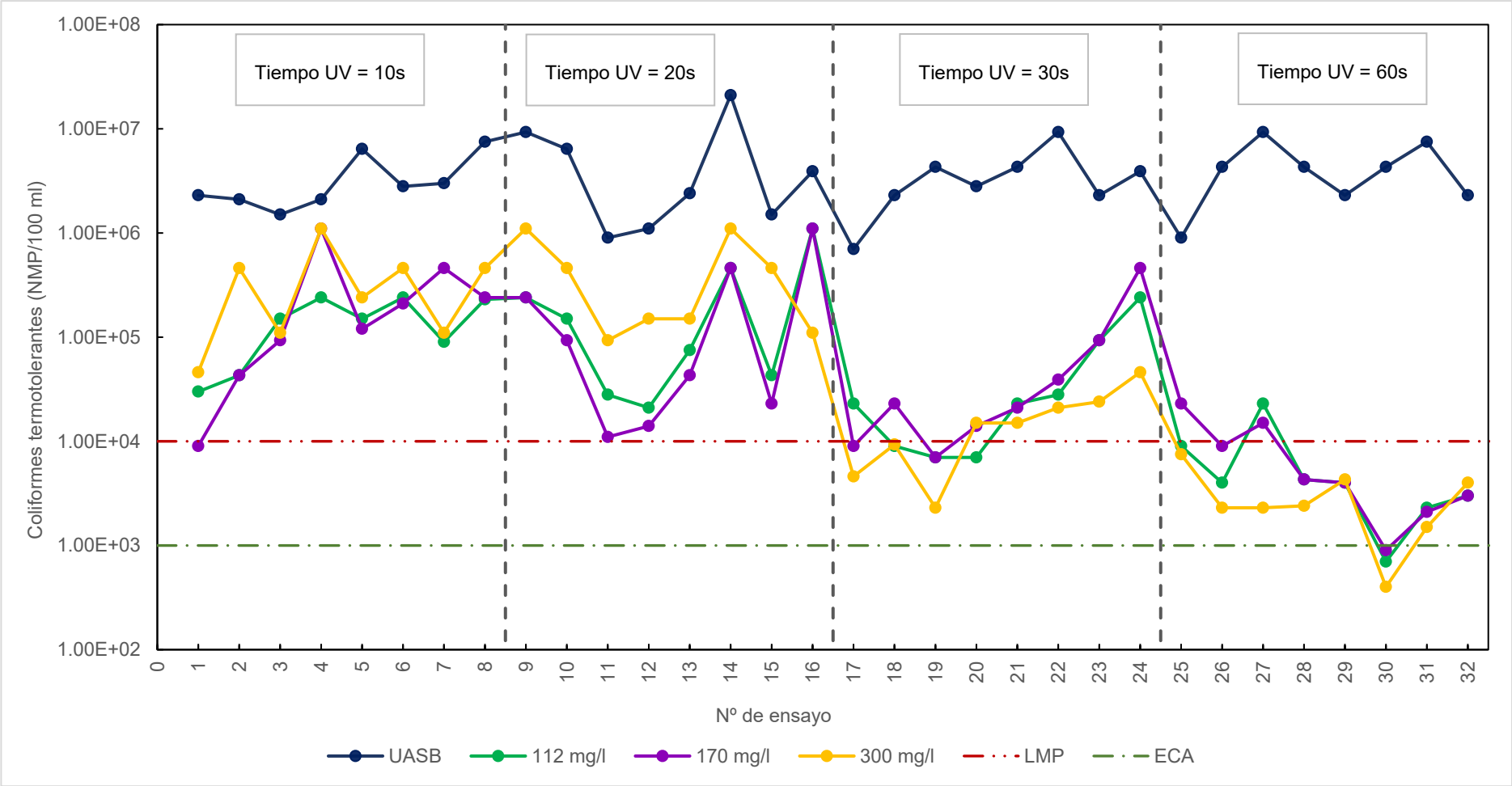


Figura 35

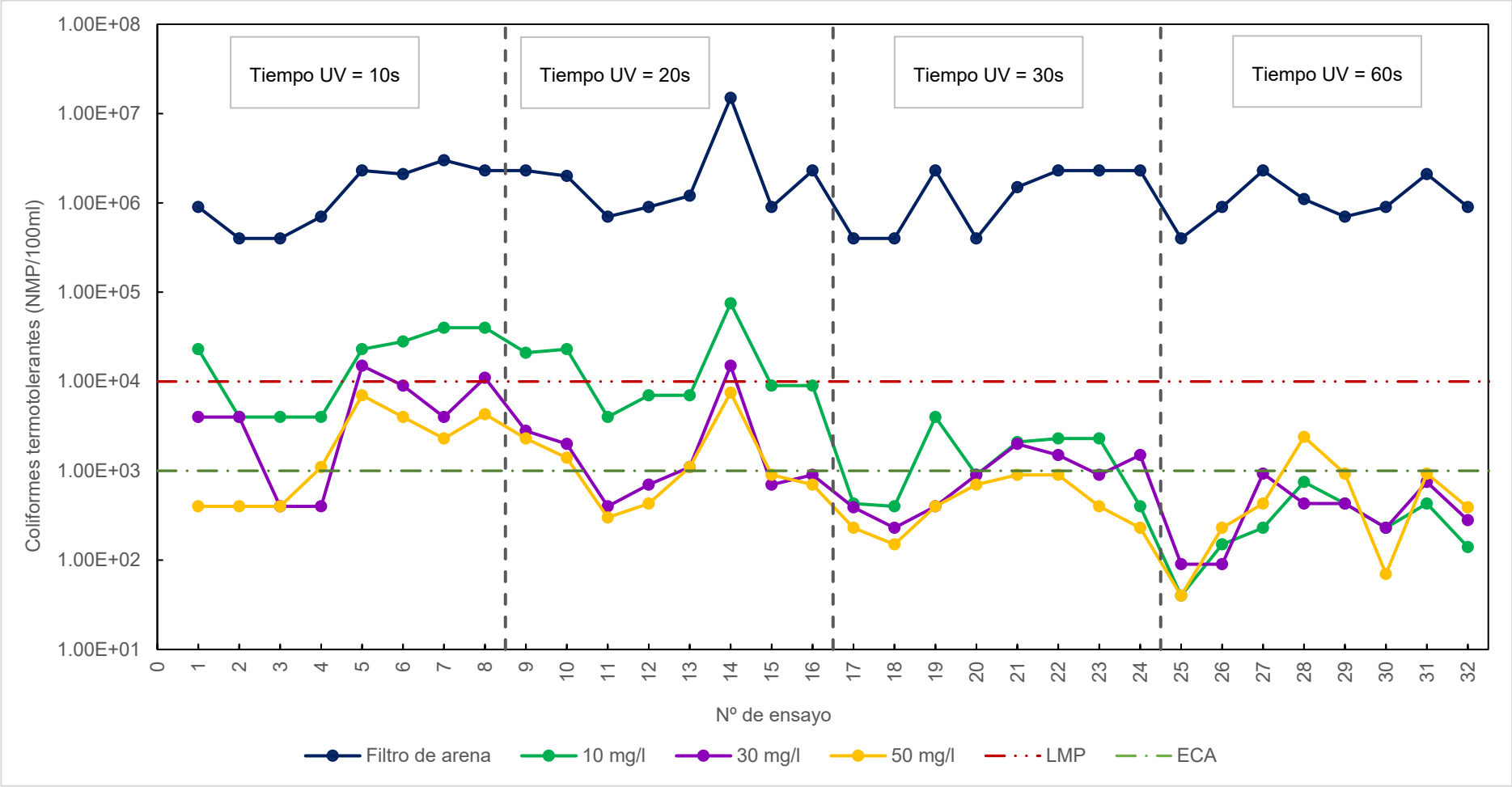
Coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 36

Coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

4.10 Sólidos suspendidos totales (SST)

4.10.1 Configuración N°01

Tabla 33

Resultados del rango de sólidos suspendidos totales-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de sólidos suspendidos totales (mg/l)		
10 segundos	-	35.00	-	55.00
	112	34.00	-	52.00
	170	28.00	-	42.00
	300	30.00	-	46.00
20 segundos	-	37.00	-	50.00
	112	31.00	-	43.00
	170	35.00	-	49.00
	300	32.00	-	42.00
30 segundos	-	35.00	-	52.00
	112	23.00	-	45.00
	170	30.00	-	44.00
	300	21.00	-	44.00
60 segundos	-	33.00	-	55.00
	112	22.00	-	39.00
	170	27.00	-	34.00
	300	27.00	-	40.00

4.10.2 Configuración N°02

Tabla 34

Resultados del rango de sólidos suspendidos totales-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de sólidos suspendidos totales (mg/l)		
10 segundos	-	3.60	-	5.20
	10	3.60	-	6.00
	30	4.00	-	6.40
	50	3.60	-	6.80
20 segundos	-	4.00	-	8.80
	10	5.20	-	12.00
	30	4.80	-	10.00
	50	4.40	-	10.00
30 segundos	-	3.20	-	6.00
	10	6.00	-	6.80
	30	5.60	-	8.80
	50	5.20	-	7.20
60 segundos	-	4.00	-	6.00
	10	4.80	-	6.00
	30	5.20	-	7.20
	50	3.20	-	7.20

Figura 37

Sólidos suspendidos totales del reactor UASB y Filtro de arena Vs N° de ensayo.

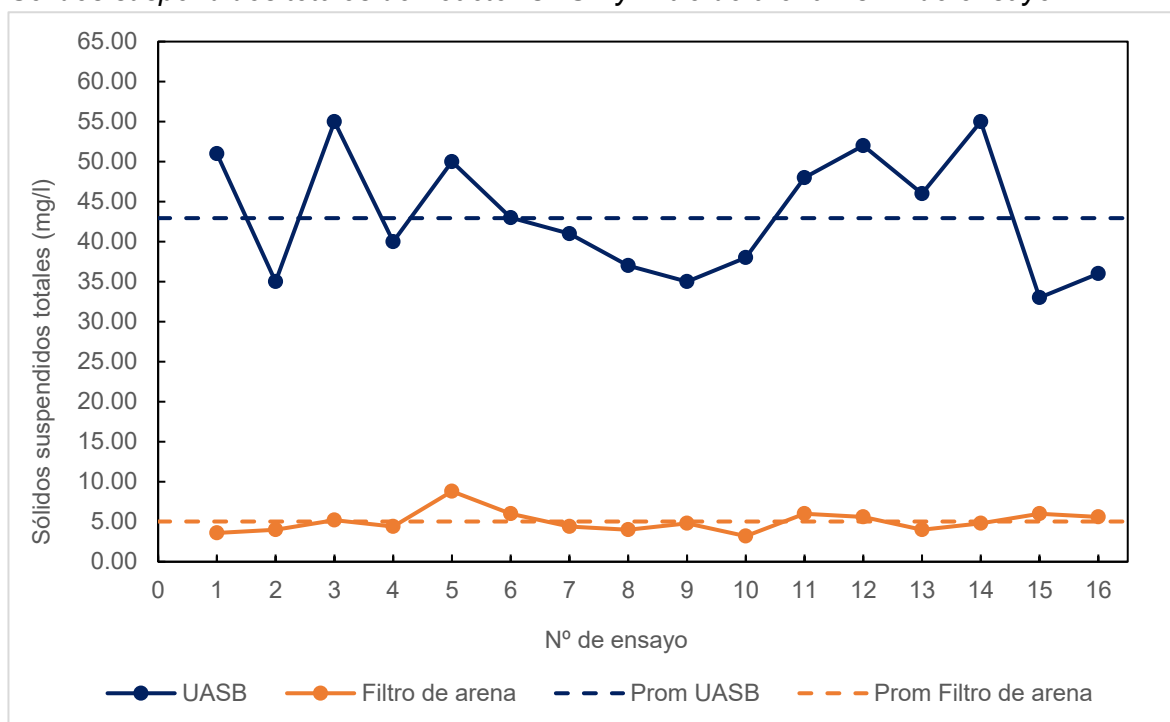
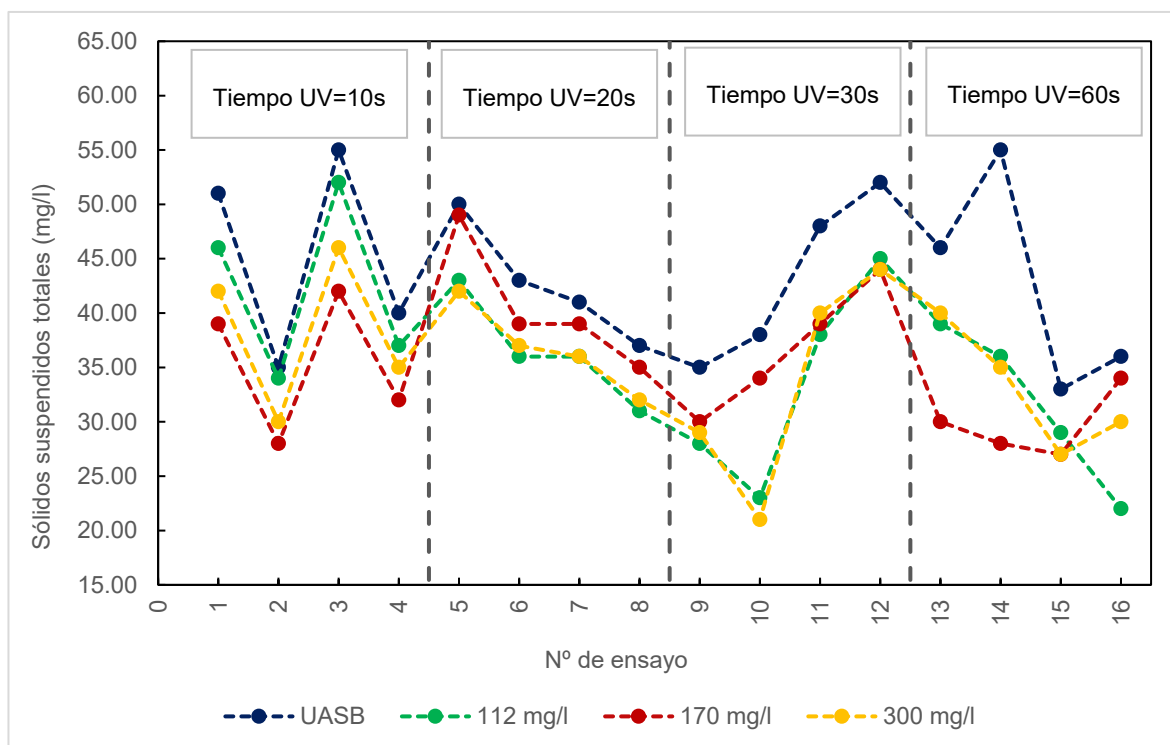


Figura 38

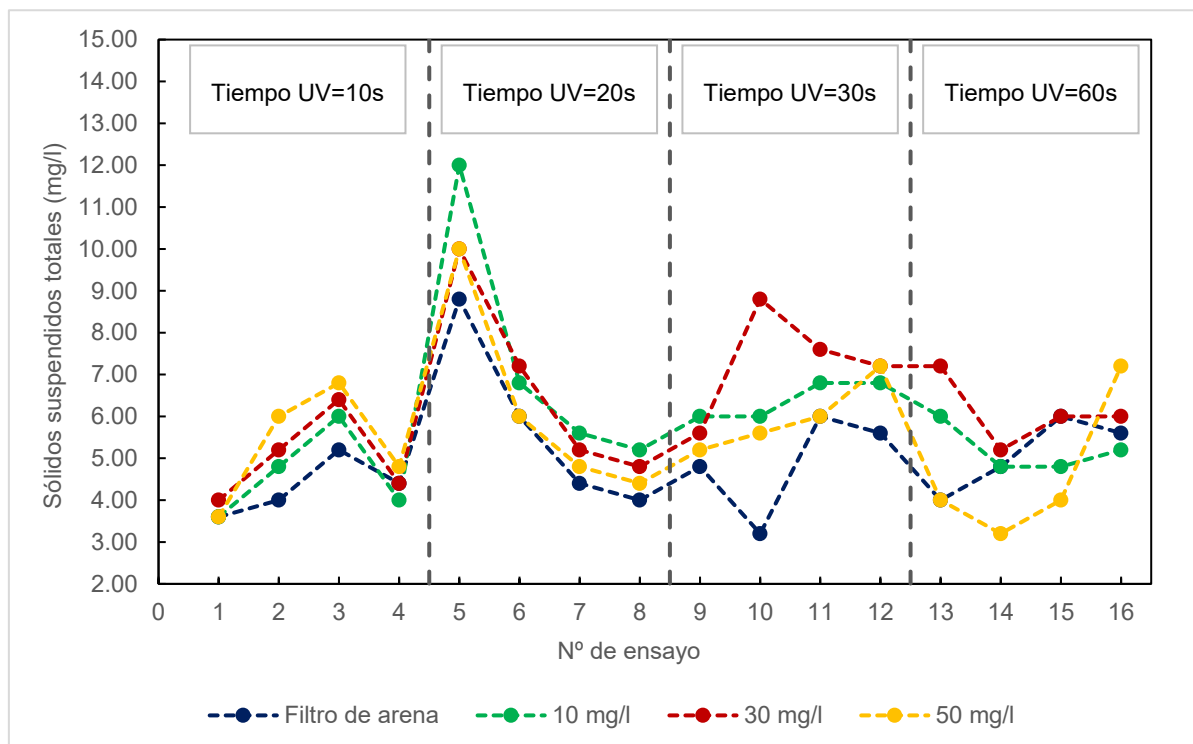
Sólidos suspendidos totales Vs N° de ensayo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 39

Sólidos suspendidos totales Vs N° de ensayo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H_2O_2

4.11 Peróxido de hidrógeno residual

4.11.1 Configuración N°01

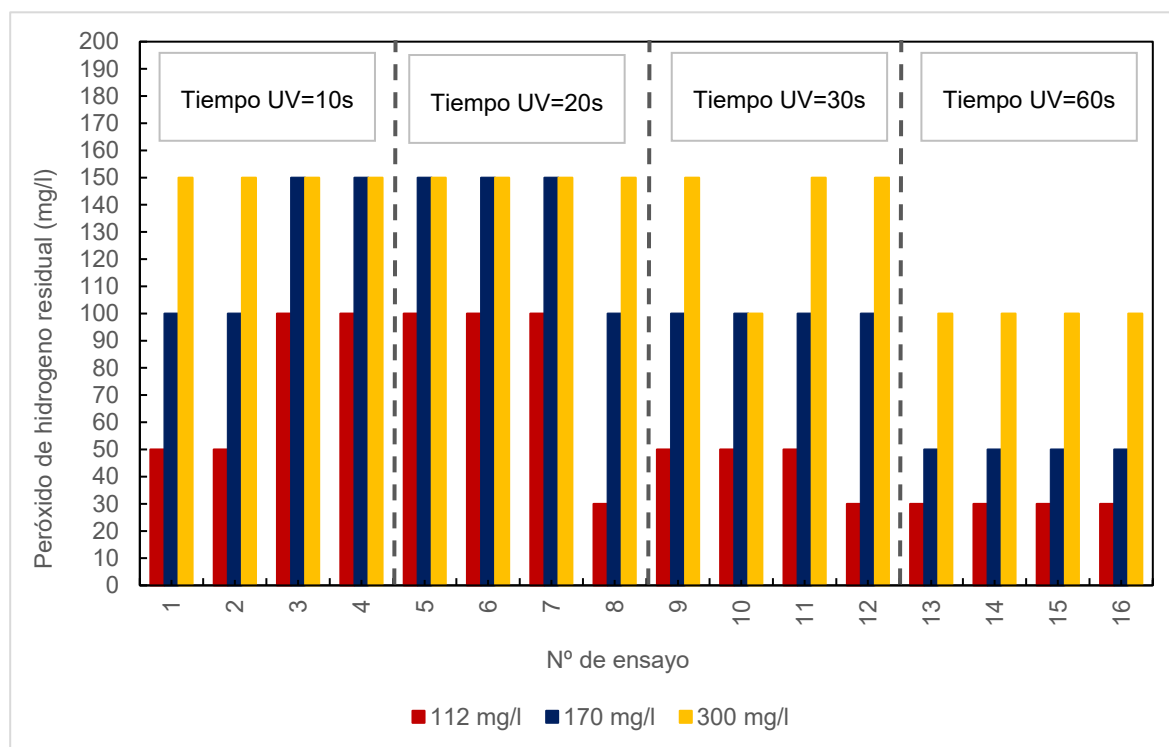
Tabla 35

Resultados del rango de H_2O_2 residual-configuración N°01.

Tiempo de contacto UV	H_2O_2 (mg/l)	Rango de peróxido de hidrógeno residual (mg/l)		
10 segundos	112	50.00	-	100.00
	170	100.00	-	150.00
	300	150.00	-	150.00
20 segundos	112	30.00	-	100.00
	170	100.00	-	150.00
	300	150.00	-	150.00
30 segundos	112	30.00	-	50.00
	170	100.00	-	100.00
	300	100.00	-	150.00
60 segundos	112	30.00	-	30.00
	170	50.00	-	50.00
	300	100.00	-	100.00

Figura 40

Peróxido de hidrógeno residual Vs N° de ensayo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

4.11.2 Configuración N°02

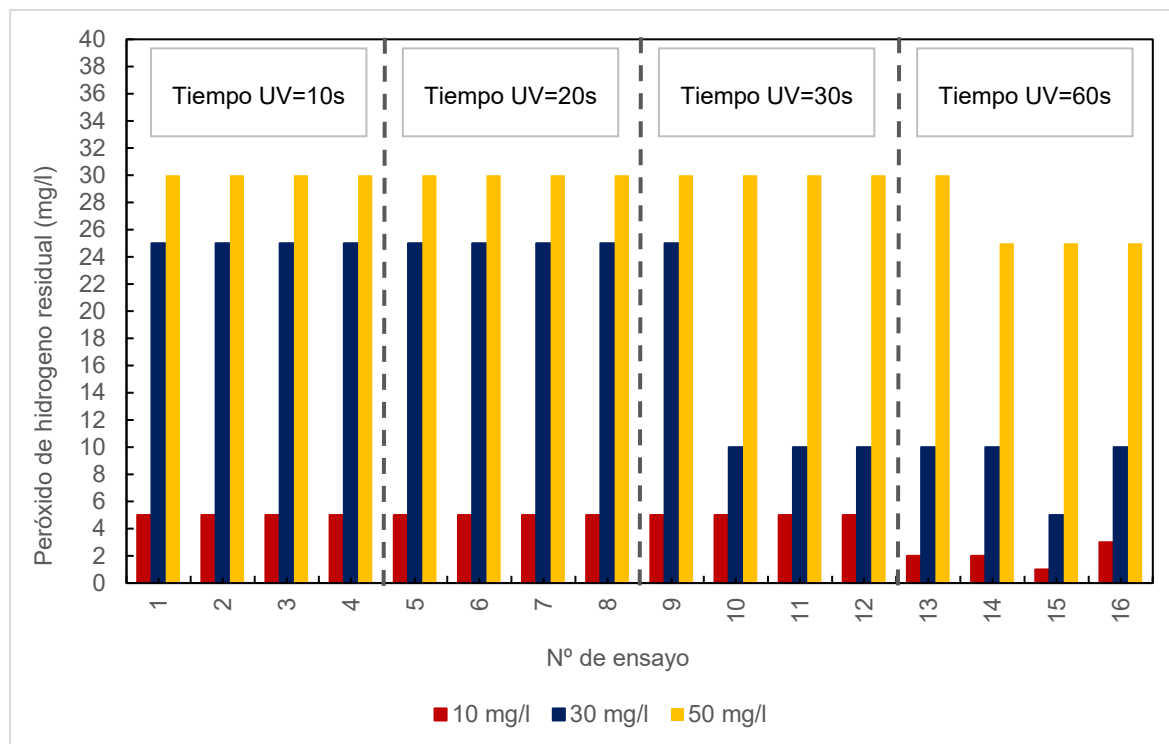
Tabla 36

Resultados del rango de H₂O₂ residual-configuración N°02.

Tiempo de contacto UV	H ₂ O ₂ (mg/l)	Rango de peróxido de hidrógeno residual (mg/l)		
10 segundos	10	5.00	-	5.00
	30	25.00	-	25.00
	50	30.00	-	30.00
20 segundos	10	5.00	-	5.00
	30	25.00	-	25.00
	50	30.00	-	30.00
30 segundos	10	5.00	-	5.00
	30	10.00	-	25.00
	50	30.00	-	30.00
60 segundos	10	1.00	-	3.00
	30	5.00	-	10.00
	50	25.00	-	30.00

Figura 41

Peróxido de hidrógeno residual Vs N° de ensayo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Capítulo V. Análisis y discusión de resultados

5.1 pH y temperatura

Los resultados de la investigación muestran que el proceso de filtración del efluente del reactor UASB genera un incremento promedio del 4.47% en el pH y una reducción promedio del 3.52% en la temperatura. El aumento del pH sugiere que el proceso de filtración tiene la capacidad de disminuir la acidez de la muestra afluente. Este incremento en el pH probablemente se deba a la remoción del dióxido de carbono presente en el agua residual durante el proceso de filtración (Meza Pinedo, 2019). En cuanto a la reducción de la temperatura, esta puede atribuirse al intercambio de calor entre el agua residual y el medio filtrante (Rojas Torres, 2020).

Los valores de pH registrados del efluente del reactor UASB y del filtro de arena, según Castro-Peña y Durán-Herrera (2014) estuvieron dentro de un rango alcalino donde el peróxido de hidrógeno se descompone en agua y oxígeno molecular en lugar de generar radicales hidroxilo, teniendo en promedio un pH de 7.43 ± 0.23 y 7.78 ± 0.28 respectivamente. No obstante, otras investigaciones afirman que la eficiencia del proceso no varía significativamente para valores pH ligeramente alcalinos, como lo indica Cruz Montes (2015) quien argumenta que el proceso fotoquímico es más eficiente en medios alcalinos, pues esto aumenta la tasa de fotólisis del peróxido de hidrógeno. Por lo tanto, se puede inferir que la remoción de coliformes termotolerantes en esta investigación a pesar de las condiciones de pH alcalino se encuentra dentro de un rango óptimo.

Con respecto a los resultados luego del tratamiento, el estudio encontró variaciones en el pH y la temperatura de las muestras tratadas dependiendo de la dosis y del tiempo de contacto UV, como se muestra en las Tablas 37 y 38.

Respecto al pH los resultados de la configuración N°01 mostraron incrementos conforme aumentaba la dosis de peróxido de hidrógeno de 112 a 170 mg/l durante todos los tiempos de contacto, alcanzando el mayor incremento promedio a los 20 segundos de

exposición UV, mientras que la dosis de 300 mg/l generaba incrementos menores e incluso negativos en comparación a las dosis anteriores, durante todos los tiempos de contacto.

Estos incrementos en los valores del pH pueden atribuirse a la formación de iones hidroxilo (OH^-) durante la fotólisis del peróxido de hidrógeno en medio acuoso (Cruz Montes, 2015). Sin embargo, según Baquero Guayacán (2014) a concentraciones elevadas, el peróxido de hidrógeno actúa como secuestrador de radicales hidroxilo ($\text{OH}^\bullet$) afectando la eficiencia del proceso, lo que explicaría la menor variación en el pH para la dosis de 300 mg/l. En contraste, los resultados de la configuración N°02 mostraron variaciones porcentuales menores, las cuales presentaban la tendencia de disminuir conforme aumentaba la dosis de peróxido de hidrógeno y el tiempo de contacto UV como se observa en la Tabla 37. Esto podría explicarse por la menor formación de iones hidroxilo, producto de la reducción de las dosis de peróxido de hidrógeno.

Tabla 37

Variación porcentual del pH promedio.

Configuración	H_2O_2	10 s	20 s	30 s	60 s
N°1	112 mg/l	3.07	3.98	2.04	3.15
	170 mg/l	3.21	4.67	2.04	3.15
	300 mg/l	1.20	1.79	-0.41	0.92
N°2	10 mg/l	0.77	0.79	0.65	0.86
	30 mg/l	0.01	-0.26	-0.26	-0.99
	50 mg/l	-0.90	-0.66	-0.65	-1.48

En cuanto a la temperatura los resultados posteriores al tratamiento, en la configuración N°01 muestran una tendencia decreciente en los valores de temperatura para todas las dosis, alcanzando reducciones promedio negativas en la mayoría de los tiempos de contacto UV, como se observa en la Tabla 38. Por el contrario, los resultados de la configuración N°02 muestran una tendencia creciente en los valores luego de la aplicación del proceso para todas las dosis y tiempos de contacto, lo cual influiría en la eficiencia del proceso, debido a que el aumento de temperatura propiciaría un aumento en la velocidad de las reacciones de oxidación (Primo Martínez, 2008).

Probablemente las variaciones de temperatura encontradas en la investigación se deban a la eficiencia en la transferencia de energía entre las lámparas UV y el agua. Al no estar en contacto directo con el agua, la transferencia de calor es menos eficiente en comparación con sistemas que utilizan lámparas sumergidas, en el caso de las muestras sin filtrar, la presencia de sólidos en suspensión pudo bloquear o dispersar parte de la radiación, lo que podría explicar la presencia de variaciones incluso negativas en la temperatura. Por el contrario, en las muestras filtradas, la menor concentración de sólidos permitiría una mayor penetración de la radiación UV y una mejor absorción de la energía disponible, lo que provocaría el aumento de temperatura registrado.

Tabla 38

Variación porcentual de la temperatura promedio.

Configuración	H ₂ O ₂	10 s	20 s	30 s	60 s
Nº1	112 mg/l	-1.15	-1.11	-1.15	-0.78
	170 mg/l	-0.71	-0.47	-0.49	-0.24
	300 mg/l	-0.55	-0.05	0.33	-0.05
Nº2	10 mg/l	0.69	0.49	0.79	0.65
	30 mg/l	0.29	0.43	0.57	0.35
	50 mg/l	0.46	0.81	0.45	0.65

5.2 Turbiedad

La eficiencia de remoción de turbiedad promedio del filtro de arena fue igual a 85.61 ± 8.70 %, con valores que oscilaron entre 42.08 y 97.46%.

Los resultados de la Configuración N°01 mostraron incrementos en la turbiedad de las muestras, luego del tratamiento empleando las 03 dosis de peróxido de hidrógeno y todos los tiempos de contacto UV como se observa en la Tabla 39. La dosis de 112 mg/l provocó incrementos promedios entre el 263.86 al 319.48%, con la dosis de 170 mg/l incrementos entre el 230.63 al 273.77% y finalmente con la dosis de 300 mg/l incrementos entre el 179.27 al 216.33%.

El aumento en los valores de la turbiedad registrados probablemente se deban a una oxidación incompleta o parcial de la materia coloidal, lo que provocaría la formación

de partículas coloidales en suspensión que aumentarían la turbiedad de las muestras, la cual se revirtió progresivamente a medida que aumento la dosis de peróxido de hidrógeno (Rodríguez Peña & Barrera Diaz, 2020).

Por el contrario, los resultados de la configuración N°02 a excepción de la dosis de 10 mg/l para el tiempo UV de 10 segundos, mostraron reducciones en los valores de la turbiedad que fueron aumentando conforme se incrementaba la dosis de peróxido de hidrógeno y los tiempos de contacto UV, alcanzando una máxima reducción promedio de 18.61% con la dosis de 50 mg/l para el tiempo de contacto UV de 60 segundos. Esta reducción de turbiedad se debe a que los radicales hidroxilos oxidan la materia coloidal del agua residual convirtiéndola en material disuelto, por lo que, a mayor dosis de peróxido, el proceso de oxidación sería más eficiente (Lanuza Val, 2012).

Tabla 39

Variación porcentual de la turbiedad promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
N°1	112 mg/l	267.74	290.23	263.86	319.48
	170 mg/l	249.19	256.48	230.63	273.77
	300 mg/l	200.42	207.41	179.27	216.33
N°2	10 mg/l	29.53	-3.66	-6.31	-15.13
	30 mg/l	-0.78	-5.24	-9.33	-15.88
	50 mg/l	-2.24	-4.19	-5.02	-18.61

5.3 Oxígeno disuelto

Los resultados muestran un incremento promedio del 1856% del oxígeno disuelto de las muestras del reactor UASB luego del proceso de filtración. El incremento de oxígeno disuelto en las muestras puede explicarse por la interacción del agua residual con el aire atrapado en los poros del medio filtrante, al fluir el agua a través del filtro este aire puede disolverse, elevando los niveles de OD.

Respecto a los resultados después de la aplicación del proceso, para ambas configuraciones de tratamiento, se obtuvieron incrementos en los valores de oxígeno disuelto, que fueron desde el 300 al 4900% aproximadamente para las muestras sin filtrar

y del 1 al 11% para las muestras filtradas como se observa en la Tabla 40. Se observó que conforme aumentaba la dosis y el tiempo de contacto UV, mayor eran los incrementos en el oxígeno disuelto. Este comportamiento podría estar asociados a la descomposición del peróxido de hidrógeno que no absorbió la radiación UV, debido a que en medios acuosos este puede descomponerse espontáneamente y generar oxígeno molecular libre en lugar de generar radicales hidroxilo (Castro-Peña & Durán-Herrera, 2014).

Tabla 40

Variación porcentual del oxígeno disuelto promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
Nº1	112 mg/l	676.47	334.62	379.66	1756.00
	170 mg/l	1258.82	617.31	767.80	2868.00
	300 mg/l	2167.65	1232.69	1362.71	4940.00
Nº2	10 mg/l	1.95	1.49	1.34	1.73
	30 mg/l	4.46	4.36	5.60	7.29
	50 mg/l	7.55	7.22	8.28	11.62

5.4 Conductividad

Los resultados demostraron que el proceso de filtración provocó un incremento promedio del 16.82% en el valor de la conductividad afluente. Este incremento probablemente se deba al intercambio iónico provocado por los compuestos químicos presentes en el medio filtrante (arena tipo sílica) como sales minerales y el agua residual (Gómez Dunkley, 2018).

El análisis de la conductividad luego del tratamiento mostró fluctuaciones en los valores, con una tendencia a disminuir como se observa en la Tabla 41. No obstante, las reducciones porcentuales fueron mayores en la configuración N°01 en comparación con la configuración N°02, alcanzando reducciones promedio máximas de 1.73 y 0.36% respectivamente. Según Rodríguez Urviola y Neira Paniura (2020), estas variaciones se deben a la continua formación de especies químicas más sencillas y subproductos de la oxidación de la materia orgánica presente en las muestras. Esto puede indicar de que se logró la mineralización completa de una parte de la materia orgánica de las muestras,

debido a que esto resulta en la conversión de CO₂, agua e iones inorgánicos (Comninellis, 1994).

Esto explicaría la mayor variación de resultados para las dosis de peróxido más altas de peróxido, debido a que una mayor concentración de reactivo favorecería la generación de reacciones secundarias y la formación de una mayor cantidad de iones inorgánicos.

Tabla 41

Variación porcentual de la conductividad promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
Nº1	112 mg/l	-1.10	-1.67	-0.58	-0.90
	170 mg/l	-0.91	-0.86	-0.77	-1.30
	300 mg/l	-1.73	-1.52	-1.06	-1.71
Nº2	10 mg/l	0.05	0.01	0.14	-0.03
	30 mg/l	-0.14	-0.20	-0.04	-0.30
	50 mg/l	-0.33	-0.34	-0.36	-0.20

5.5 Transmitancia

El proceso de filtración aplicado a las muestras del reactor UASB aumento la transmitancia promedio del agua en aproximadamente 908.64%. Este efecto se debe a la eliminación de turbiedad y solidos suspendidos que al dispersar y absorber la luz UV, reducen la cantidad de radiación que puede atravesar la muestra. Reyes Prado (2020) afirma que bajas transmitancias en aguas residuales dificultan la formación de radicales hidroxilos durante la aplicación del proceso UV/H₂ O₂ reduciendo la eficiencia de remoción de contaminantes y aumentando los costos del tratamiento. Por lo que se puede inferir que el incremento en la transmitancia logrado mediante el proceso de filtración resultará en una mayor eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes al permitir una mayor penetración y disponibilidad de la luz UV en la muestra, optimizando la fotólisis del peróxido de hidrógeno y en consecuencia la generación de radicales hidroxilos (Primo Martínez, 2008).

Los resultados obtenidos de la configuración Nº01 muestran reducciones en el valor de la transmitancia de las muestras conforme se incrementan la dosis de peróxido de

hidrógeno y el tiempo de contacto UV, alcanzando una reducción máxima promedio de 57.54% para la dosis de 300 mg/l y un tiempo de contacto UV de 60 segundos. Estas reducciones probablemente se deban a una degradación parcial o incompleta de la materia orgánica, produciendo materia disuelta o compuestos de oxidación intermedios por insuficiente dosis o tiempo de contacto UV (Rodríguez Peña & Barrera Diaz, 2020). Unos de estos compuestos químicos podrían ser los ácidos carboxílicos los cuales son generados por la oxidación de los ácidos grasos volátiles presentes en los efluentes anaerobios.

La configuración N°02 por su parte también presento la tendencia de reducción en los valores de la transmitancia conforme aumentaba la dosis y el tiempo de contacto UV, pero menores respecto a la configuración N°01 con reducciones entre 0.51 a 8.00%. Sin embargo, en el caso de la dosis de 10 mg/l y el tiempo de contacto UV de 60 segundos se obtuvo el efecto contrario, el cual provoco que la transmitancia promedio aumentara en 1.53% aproximadamente. Este comportamiento sugiere que la oxidación de la materia orgánica generó subproductos capaces de absorber la luz ultravioleta, al igual que en las muestras de la configuración N°01, aunque en menor magnitud. Esta diferencia podría atribuirse a la menor concentración de turbiedad, sólidos suspendidos y dosis de peróxido. En este sentido, la dosis de 10 mg/L sería la única que posiblemente logró una degradación efectiva de estos compuestos luego de 60 segundos de contacto UV.

Tabla 42

Variación porcentual de la transmitancia promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
N°1	112 mg/l	-45.30	-47.61	-43.01	-52.22
	170 mg/l	-46.57	-48.91	-41.71	-55.03
	300 mg/l	-47.05	-52.54	-38.86	-57.54
N°2	10 mg/l	-1.67	-1.43	-0.77	1.53
	30 mg/l	-3.17	-2.66	-3.59	-0.51
	50 mg/l	-7.81	-5.34	-8.00	-3.05

5.6 Sólidos suspendidos totales

La eficiencia de remoción promedio de sólidos suspendidos totales del filtro de arena fue 88.21 ± 3.26 %, con valores que oscilaron entre 81.82 y 92.94%.

Los resultados de la configuración N°01 mostraron reducciones en la concentración de sólidos suspendidos luego del tratamiento, como se observa en la Tabla 43, presentando las mayores reducciones durante el periodo del tiempo de contacto UV de 60 segundos para las 03 dosis de peróxido de hidrógeno, con reducciones promedio entre el 22 y 30%. Por el contrario, los resultados de la configuración N°02 mostraron incrementos promedio en la concentración de sólidos suspendidos entre 1 y 49% aproximadamente, con excepción de los resultados provenientes de la dosis de 50 mg/l y el tiempo de contacto UV de 60 segundos, los cuales fueron los únicos en mostrar reducciones.

Las remociones observadas probablemente se deban a la oxidación de la materia orgánica de las muestras por acción de los radicales hidroxilos, produciendo sustancias más solubles, disminuyendo así la fracción de sólidos en suspensión (Lanuza Val, 2012).

Los resultados sugieren que la mayor dosificación de peróxido de hidrógeno utilizada en la configuración N°01 propicio una reducción de la concentración de sólidos suspendidos más eficiente en las muestras, en comparación de la configuración N°02, la cual solo logro una reducción de sólidos suspendidos con la mayor dosificación, aunque con reducciones más bajas.

Tabla 43

Variación porcentual de los SST promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
N°1	112 mg/l	-5.06	-14.62	-22.54	-23.64
	170 mg/l	-20.79	-5.26	-15.03	-27.88
	300 mg/l	-14.04	-14.04	-22.54	-20.00
N°2	10 mg/l	6.98	27.59	30.61	1.96
	30 mg/l	16.28	17.24	48.98	19.61
	50 mg/l	23.26	8.62	22.45	-9.80

5.7 Peróxido de hidrógeno residual

Los resultados de las pruebas realizadas a las muestras del reactor UASB con las dosis de 112, 170 y 300 mg/L de peróxido de hidrógeno presentaron una reducción promedio de la concentración del H_2O_2 que aumentó conforme se incrementó la dosis y el tiempo de contacto UV como se observa en la Tabla 44, con reducciones entre el 19 y 73% aproximadamente, siendo el tiempo de contacto UV de 60 segundos el que provocó la mayor reducción en la concentración del H_2O_2 , mientras que las pruebas realizadas en las muestras del Filtro de arena, con las dosis de 10, 30 y 50 mg/L mostraron una degradación más uniforme del H_2O_2 , evidenciada por sus desviaciones estándar menores, con reducciones entre el 16 y 80%, reportando de igual forma las mayores reducciones en las concentraciones después del tiempo de contacto de 60 segundos.

Este comportamiento probablemente se debe a que, al incrementar el tiempo de contacto UV, el peróxido de hidrógeno absorbe una mayor cantidad de energía, lo que favorece una mayor generación de radicales hidroxilos (Rodríguez Urviola & Neira Paniura, 2020).

En contraste los resultados de las pruebas realizadas a las muestras del Filtro de arena con las dosis de 10, 30 y 50 mg/L de peróxido de hidrógeno presentaron reducciones con una mayor estabilidad, reflejada en menores desviaciones estándar en comparación con las muestras no filtradas, a pesar de que ambas mostraron reducciones similares conforme aumentaba el tiempo de exposición a la radiación UV. Esta mayor estabilidad puede atribuirse a la eliminación de turbiedad y sólidos suspendidos durante la filtración, lo que reduce la variabilidad en la absorción de la radiación UV y minimiza reacciones secundarias no controladas con los radicales hidroxilos generados en el proceso (Amaro Soriano, 2022).

Es importante precisar que los resultados de este parámetro son de naturaleza semicuantitativa, dado que fueron obtenidos mediante tiras reactivas. Por ello, si bien reflejan una tendencia confiable en los porcentajes de reducción del reactivo, los valores específicos podrían presentar ligeras variaciones, siendo probablemente superiores o

inferiores a los registrados debido a las limitaciones del método de medición, como la interpretación subjetiva del color y la interferencia de otros compuestos presentes en las muestras.

Tabla 44

Variación porcentual del H_2O_2 residual promedio.

Configuración	Dosis	10 s	20 s	30 s	60 s
Nº1	112 mg/l	-33.04	-26.34	-59.82	-73.21
	170 mg/l	-26.47	-19.12	-41.18	-70.59
	300 mg/l	-50.00	-50.00	-54.17	-66.67
Nº2	10 mg/l	-50.00	-50.00	-50.00	-80.00
	30 mg/l	-16.67	-16.67	-54.17	-70.83
	50 mg/l	-40.00	-40.00	-40.00	-47.50

5.8 Coliformes termotolerantes

5.8.1 Concentración de coliformes termotolerantes en el agua residual

Los resultados de todo el periodo de investigación mostraron una concentración promedio de coliformes termotolerantes elevada en las aguas residuales provenientes del efluente del reactor UASB, alcanzando los $4.35 \times 10^6 \pm 3.95 \times 10^6$ NMP/100ml.

Respecto al agua residual proveniente del efluente del Filtro de arena, los resultados mostraron que la concentración promedio de coliformes termotolerantes fue de $1.83 \times 10^6 \pm 2.54 \times 10^6$ NMP/100ml, resultando en una eficiencia de remoción insignificante por parte del proceso de filtración igual a 0.41 ± 0.23 unidades logarítmicas equivalente al $55.91 \pm 23.88\%$. Esta baja eficiencia podría estar relacionada al hecho de que esta investigación no permitió el crecimiento biológico dentro del filtro de arena debido al constante lavado del medio filtrante (Metcalf & Eddy, 2014).

5.8.2 Remoción de coliformes termotolerantes del proceso UV/H₂ O₂

Los resultados de la aplicación del proceso UV/H₂ O₂ sobre las muestras del reactor UASB y el Filtro de arena, mostraron reducciones significativas en todos los ensayos obteniendo los mejores resultados durante el periodo del tiempo de contacto UV de 60 segundos.

La configuración de tratamiento N°01 mostró una eficiencia de remoción promedio de la concentración de coliformes termotolerantes entre 1.08 ± 0.28 y 3.18 ± 0.63 unidades logarítmicas (Equivalente al $85.80 \pm 16.92\%$ y $99.83 \pm 0.28\%$ respectivamente). De acuerdo con la Figura 44 se puede observar que las eficiencias de remoción en unidades logarítmicas para cada dosis de peróxido de hidrógeno eran directamente proporcional al tiempo de contacto UV obteniendo las mayores eficiencias de remoción luego de 60 segundos de exposición, con excepción de la dosis de 112 mg/l la cual presentó eficiencias de remoción similares durante los tiempos de contacto UV de 10 y 20 segundos. También se observó que durante los primeros 20 segundos de exposición UV, el aumento de la

dosis de peróxido de hidrógeno no resultaba en una mayor eficiencia de remoción, obteniendo las menores eficiencias con la dosis de 300 mg/l como se muestra en la Tabla 45. Sin embargo, cuando el tiempo de contacto UV se incrementó a 30 y 60 segundos se obtuvo el efecto contrario, alcanzando eficiencias mayores con la dosis de 300 mg/l.

García Suescun (2010) expresa que la remoción de coliformes termotolerantes por la aplicación del proceso UV/H₂O₂ se debe a la acción de los radicales hidroxilos sobre los microorganismos, los cuales atacan la pared externa de sus células provocando reacciones de peroxidación lipídica mortales para el microorganismo. La reducción en la eficiencia de remoción observada al incrementar las dosis de peróxido durante los primeros 20 segundos de exposición UV sugiere que la dosis de peróxido en exceso actuó como secuestrador de radicales hidroxilo (Baquero Guayacán, 2014). Por lo tanto, el aumento de eficiencia obtenido al incrementar el tiempo de contacto UV probablemente se deba a que una mayor concentración de peróxido de hidrógeno fue fotolizado, reduciendo el peróxido en exceso y las reacciones secundarias que eliminaban radicales hidroxilos.

Tabla 45

Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes – Configuración N°01.

	Dosis (H ₂ O ₂)	10 segundos	20 segundos	30 segundos	60 segundos
Eficiencia de remoción en %	112 mg/l	94.78 ± 4.07	94.21 ± 9.07	98.11 ± 2.30	99.78 ± 0.32
	170 mg/l	88.88 ± 17.33	94.97 ± 9.38	97.54 ± 3.97	99.58 ± 0.86
	300 mg/l	85.80 ± 16.92	89.00 ± 8.72	99.44 ± 0.39	99.83 ± 0.28
Eficiencia de remoción en und logarítmicas	112 mg/l	1.41 ± 0.35	1.46 ± 0.38	2.08 ± 0.62	2.95 ± 0.55
	170 mg/l	1.34 ± 0.64	1.63 ± 0.45	2.00 ± 0.60	2.87 ± 0.64
	300 mg/l	1.08 ± 0.28	1.06 ± 0.31	2.39 ± 0.43	3.18 ± 0.63

La eficiencia de remoción promedio de coliformes termotolerantes en las muestras provenientes del reactor UASB con un tiempo de contacto UV de 60 segundos y dosis de peróxido de hidrógeno de 112, 170 y 300 mg/l fue inferior en un 0.12, 0.32 y 0.07% respectivamente a lo reportado por Rizvi et al. (2013) y Yasar et al. (2007), sin embargo esos estudios se desarrollaron con un reactor fotoquímico que contaba con una lámpara UV sumergida que poseía una intensidad de radiación aplicada de 5 mW/cm². Por lo tanto,

la menor eficiencia de remoción podría estar asociada a la menor intensidad de radiación de la fuente UV (4.13 mW/cm^2) y posiblemente a la configuración del reactor, debido a que la intensidad de radiación UV es inversamente proporcional a la distancia al punto de aplicación, por lo que en teoría los sistemas con lámparas UV sumergidas serían más eficientes al estar en contacto directo con el agua (Purschke et al., 2020). No obstante, debido a la mínima diferencia en la eficiencia de remoción observada en el estudio respecto a los antecedentes, resulta razonable afirmar que la configuración de lámparas suspendidas en el reactor fotoquímico no impactó significativamente en la eficiencia del proceso, esto sugiere que dicha configuración es una alternativa viable para la aplicación del sistema UV/H₂O₂. Además, su diseño ofrece ventajas económicas y operativas frente a los sistemas sumergidos, como la eliminación del recubrimiento de cuarzo en las lámparas (USEPA, 1999).

El análisis de los resultados muestra que las dosis que generan las mejores eficiencias fueron las dosis de 112 y 300 mg/l durante el tiempo de contacto UV de 60 segundos siendo esta última la mejor de las dos, sin embargo, debido a que la diferencia en las eficiencias entre ambas dosis es de tan solo 0.05% aproximadamente, indica que un incremento significativo en la dosis no se traduce en una mejora sustancial en la eficiencia del proceso. Por lo tanto, se concluye que la dosis óptima para la configuración N°01 sería la dosis de 112 mg/L, para un tiempo de contacto UV óptimo de 60 segundos, ya que permitirá alcanzar una alta eficiencia con un menor consumo de insumos.

Adicionalmente se empleó el software STATGRAPHICS Centurion para poder obtener graficas representativas que faciliten la visualización e interpretación de los resultados, como lo son la Grafica de Superficie de Respuesta y la de Contorno de Superficie de Respuesta, mostradas en la Figura 42 y 43 respectivamente. El análisis de los gráficos permite deducir que el tiempo de contacto UV influye de manera más significativa en la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes, que la dosis de peróxido aplicada.

Figura 42

Grafica de Superficie de Respuesta – Configuración N°01.

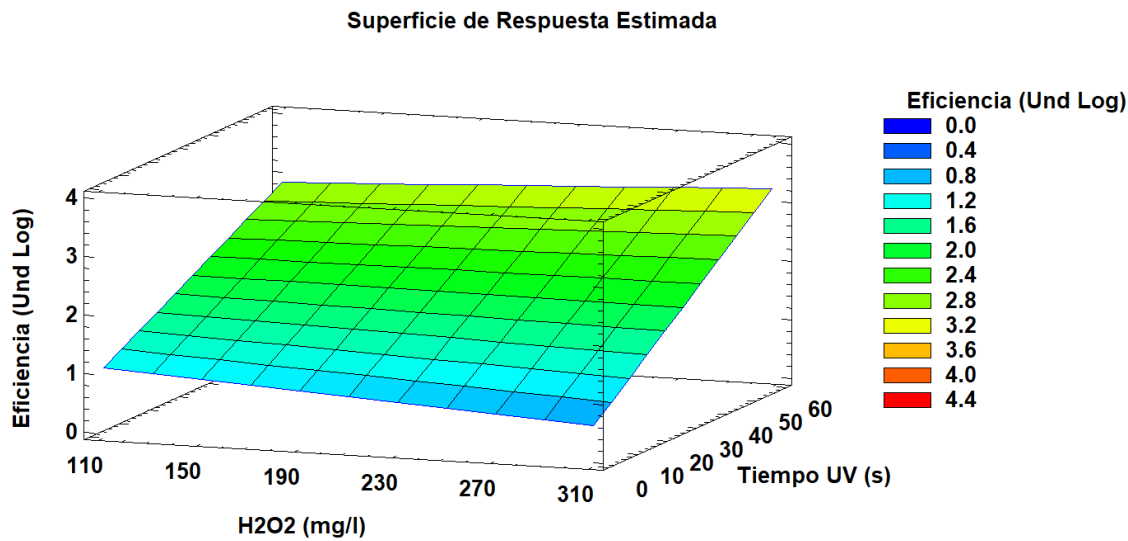


Figura 43

Grafica de Contorno de Superficie de Respuesta – Configuración N°01.

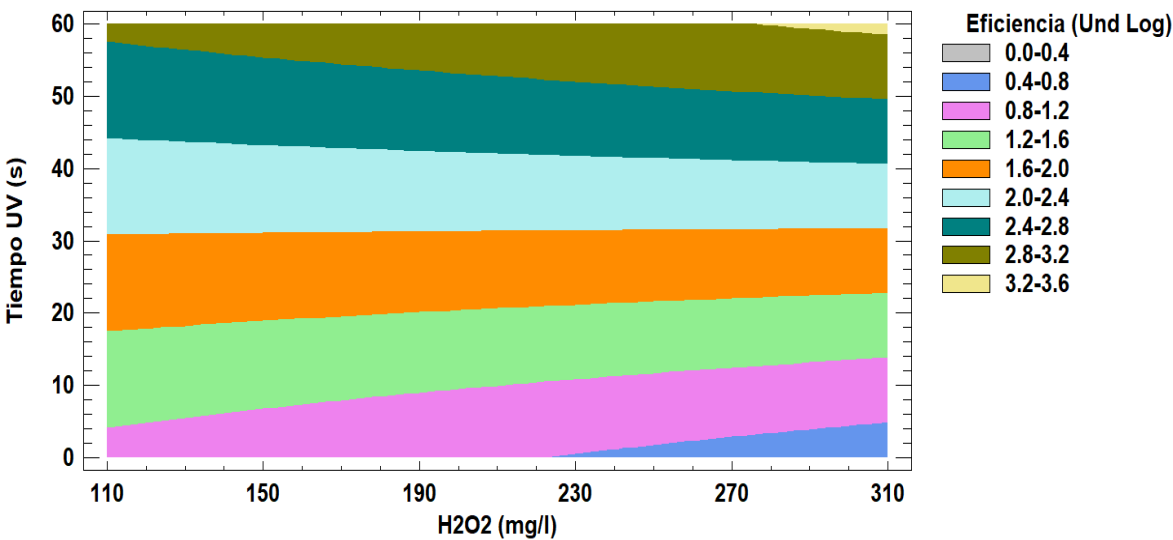
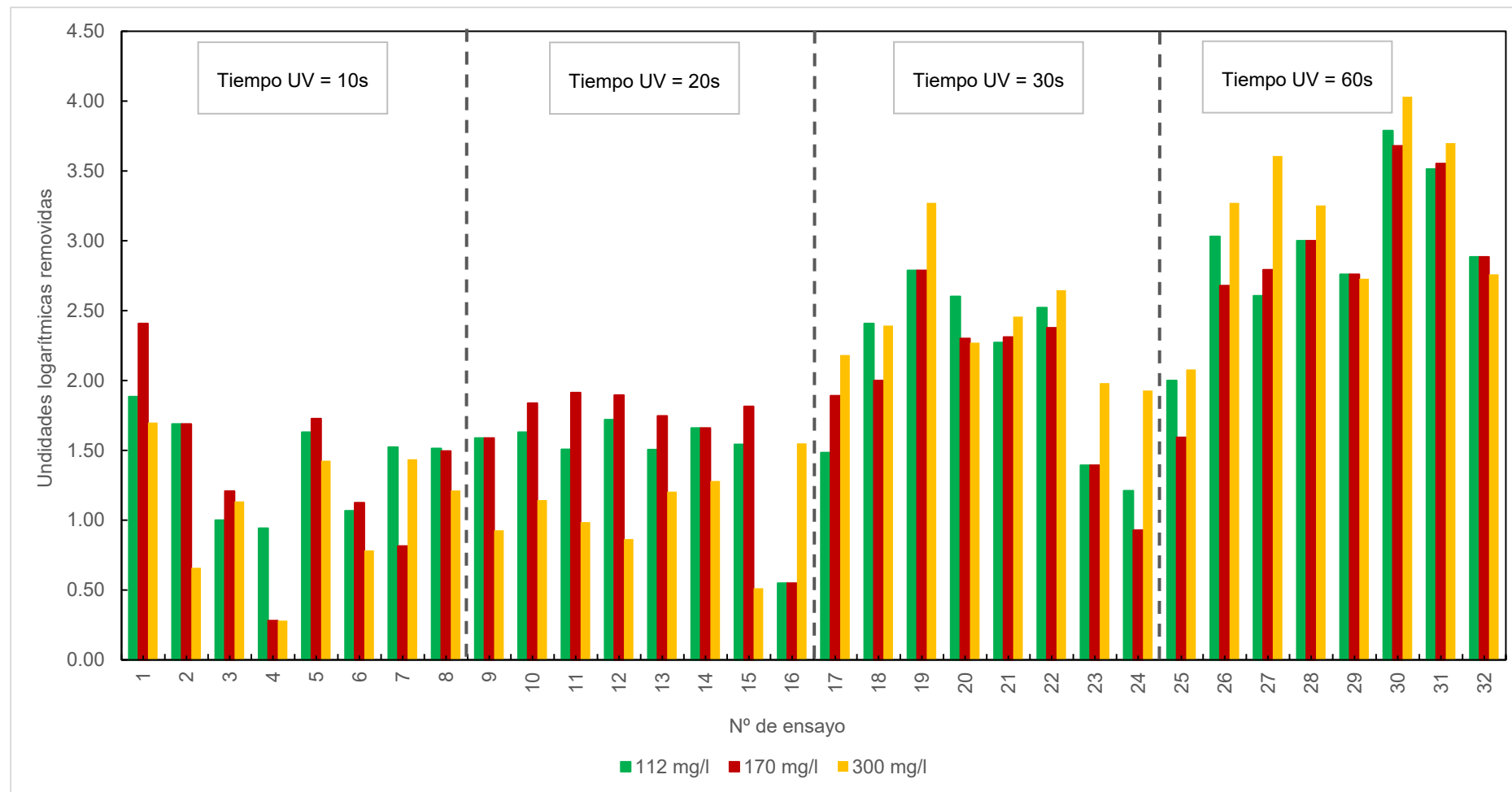


Figura 44

Remoción de coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°01.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

En contraste con los resultados presentados anteriormente, la configuración de tratamiento N°02 alcanza mejores eficiencias de remoción de coliformes termotolerantes con todas las dosis de peróxido y durante todos los tiempos de contacto UV. Los resultados mostraron una eficiencia de remoción promedio de coliformes termotolerantes entre 1.92 ± 0.19 y 3.66 ± 0.32 unidades logarítmicas (Equivalente al $98.683 \pm 0.606\%$ y $99.972 \pm 0.023\%$ respectivamente). De acuerdo con la Figura 47 se puede observar que las eficiencias de remoción en unidades logarítmicas para la dosis de 10 y 30 mg/l era directamente proporcional al tiempo de contacto UV, alcanzando las máximas eficiencias luego de 60 segundos de exposición UV, por el contrario, la dosis de 50 mg/l presentó eficiencias de remoción similares durante el intervalo de tiempo de 20 a 60 segundos. De acuerdo con la Tabla 46, la eficiencia de remoción aumentaba con la dosis durante los primeros 30 segundos de exposición UV, alcanzando las máximas eficiencias con la dosis de 50 mg/l, sin embargo, cuando el tiempo de exposición se extendió a 60 segundos, las mayores eficiencias de remoción logradas fueron con la dosis de 10 mg/l.

Tabla 46

Eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes – Configuración N°02.

	Dosis (H ₂ O ₂)	10 segundos	20 segundos	30 segundos	60 segundos
Eficiencia de remoción en %	10 mg/l	98.683 ± 0.606	99.264 ± 0.267	99.880 ± 0.061	99.972 ± 0.023
	30 mg/l	99.588 ± 0.318	99.917 ± 0.026	99.912 ± 0.066	99.967 ± 0.015
	50 mg/l	99.855 ± 0.083	99.933 ± 0.028	99.948 ± 0.053	99.937 ± 0.075
Eficiencia de remoción en und logarítmicas	10 mg/l	1.92 ± 0.19	2.16 ± 0.16	3.00 ± 0.33	3.66 ± 0.32
	30 mg/l	2.54 ± 0.44	3.10 ± 0.16	3.16 ± 0.34	3.53 ± 0.23
	50 mg/l	2.90 ± 0.26	3.21 ± 0.19	3.45 ± 0.39	3.46 ± 0.51

La eficiencia de remoción promedio de coliformes termotolerantes con un tiempo de contacto UV de 60 segundos y dosis de peróxido de hidrógeno de 10, 30 y 50 mg/l fue superior en un 0.072, 0.067 y 0.037% respectivamente a lo reportando por Rizvi et al. (2013) y Yasar et al. (2007). Los resultados muestran que el proceso de filtración previo permitió una reducción del 91.07% en la concentración del peróxido de hidrógeno en comparación con la dosis óptima requerida en el tratamiento de las muestras sin filtrar,

para alcanzar una eficiencia de remoción promedio de coliformes termotolerantes superior a la reportada en los antecedentes, esto puede atribuirse a la menor concentración de solidos suspendidos totales y turbiedad en las muestras filtradas, los cuales bloquean y dispersan la radiación UV (USEPA, 1999).

Es importante resaltar que las eficiencias mostradas en la Tabla 46 consideran como concentración de coliformes termotolerantes inicial, la concentración proveniente del efluente del filtro de arena, por lo que para determinar la eficiencia total de la configuración de tratamiento N°02 se adicionó las remociones por parte del filtro de arena como se observa en la Tabla 47.

Los resultados mostraron eficiencias de remoción promedio entre 2.33 ± 0.34 y 4.20 ± 0.31 unidades logarítmicas (Equivalente al $99.391 \pm 0.442\%$ y $99.992 \pm 0.006\%$ respectivamente). En la Figura 48 se puede observar la relación directamente proporcional entre las remociones totales del tratamiento y el tiempo de contacto UV observado anteriormente, alcanzando los máximos valores luego de 60 segundos de exposición UV. Finalmente analizando las eficiencias promedio totales logradas por las tres dosis durante el mejor tiempo de contacto, se concluye que la dosis óptima para la configuración N°02 es de 10 mg/L, para un tiempo de contacto UV óptimo de 60 segundos

Tabla 47

Eficiencia total de remoción de coliformes termotolerantes – Configuración N°02.

	Dosis (H ₂ O ₂)	10 segundos	20 segundos	30 segundos	60 segundos
Eficiencia de remoción en %	10 mg/l	99.391 ± 0.442	99.607 ± 0.157	99.952 ± 0.034	99.992 ± 0.006
	30 mg/l	99.844 ± 0.101	99.955 ± 0.017	99.969 ± 0.017	99.990 ± 0.005
	50 mg/l	99.937 ± 0.045	99.965 ± 0.014	99.984 ± 0.010	99.982 ± 0.020
Eficiencia de remoción en und logarítmicas	10 mg/l	2.33 ± 0.34	2.44 ± 0.17	3.43 ± 0.35	4.20 ± 0.31
	30 mg/l	2.95 ± 0.45	3.38 ± 0.17	3.59 ± 0.31	4.07 ± 0.29
	50 mg/l	3.31 ± 0.34	3.49 ± 0.17	3.87 ± 0.28	4.01 ± 0.52

De manera similar que con la Configuración N°01 se empleó el software STATGRAPHICS Centurion de forma complementaria, para poder obtener la Grafica de Superficie de Respuesta y la de Contorno de Superficie de Respuesta, las cuales se

muestran en la Figura 45 y 46 respectivamente. El análisis de los gráficos mostro una vez más la predominancia del parámetro tiempo de contacto UV en la eficiencia, con la excepción que para este caso las mejores eficiencias se lograron con la dosis de peróxido más baja, como se observa claramente en las figuras que se presentan a continuación.

Figura 45

Grafica de Superficie de Respuesta – Configuración N°02.

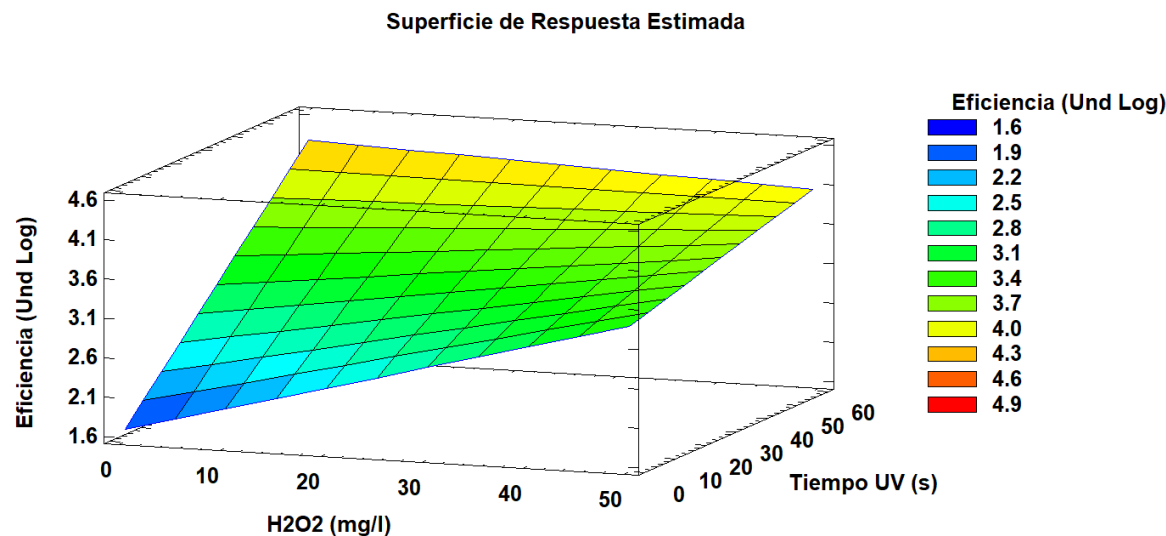


Figura 46

Grafica de Contorno de Superficie de Respuesta – Configuración N°02.

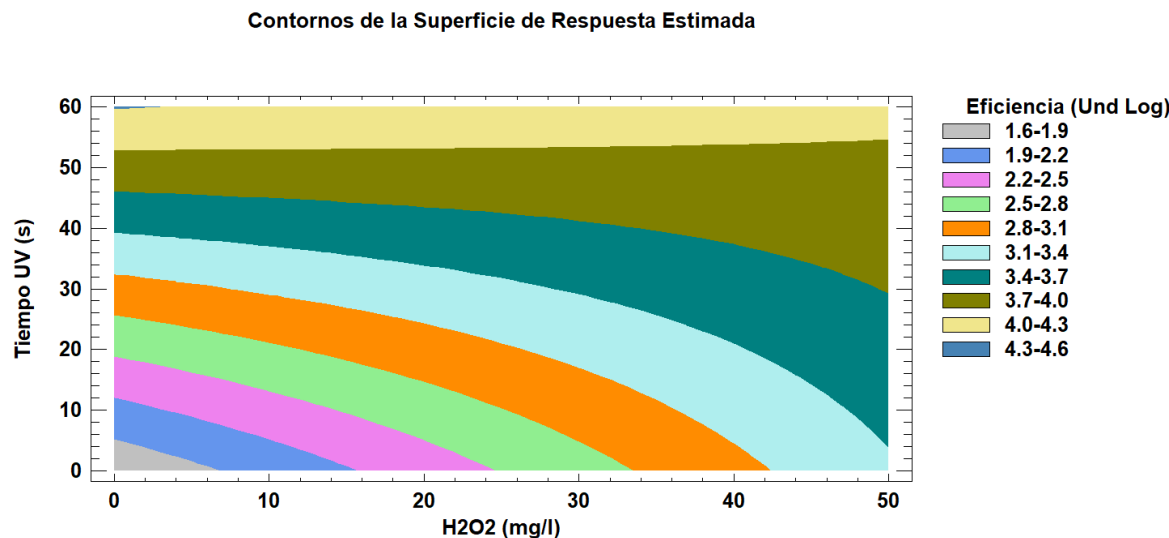
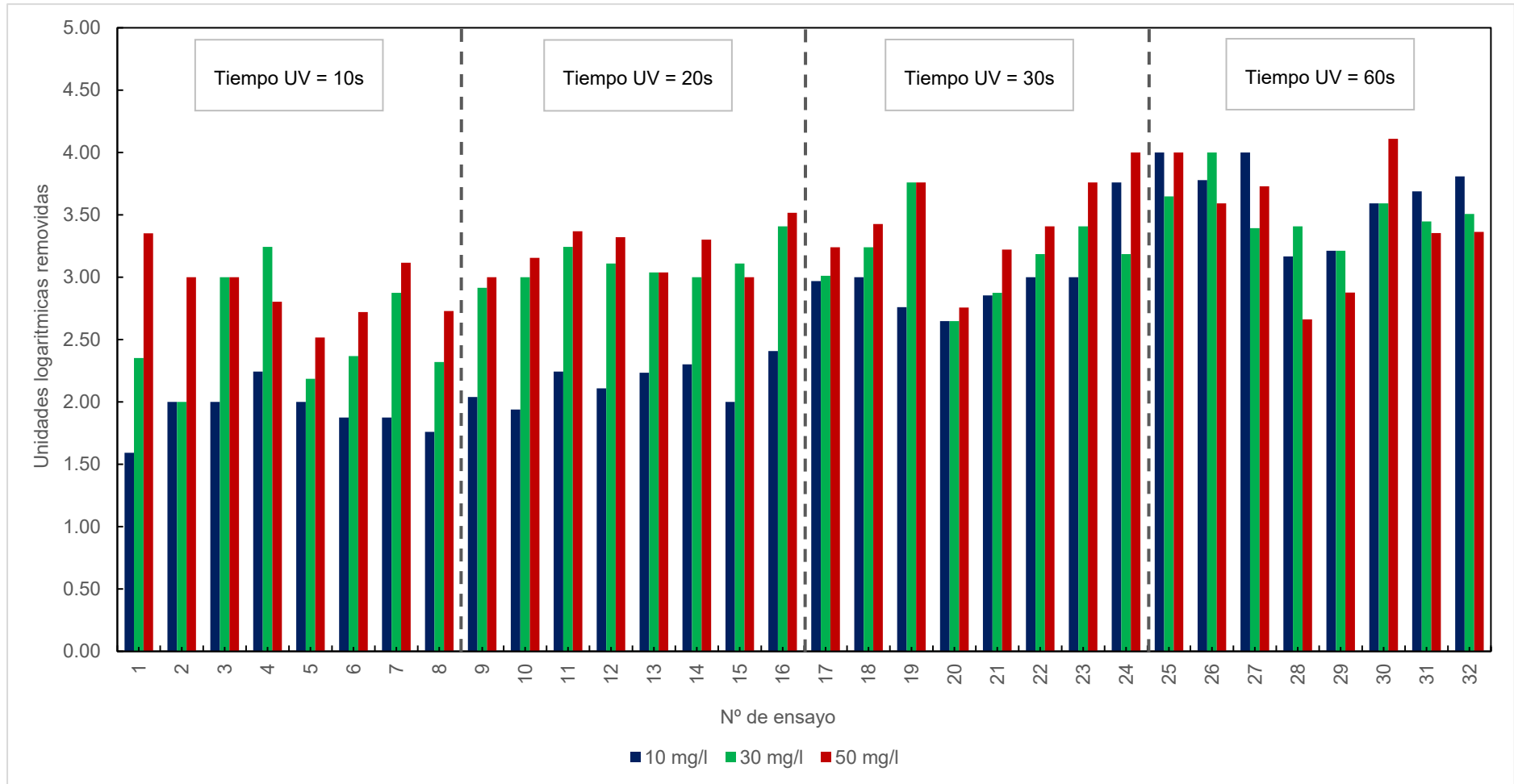


Figura 47

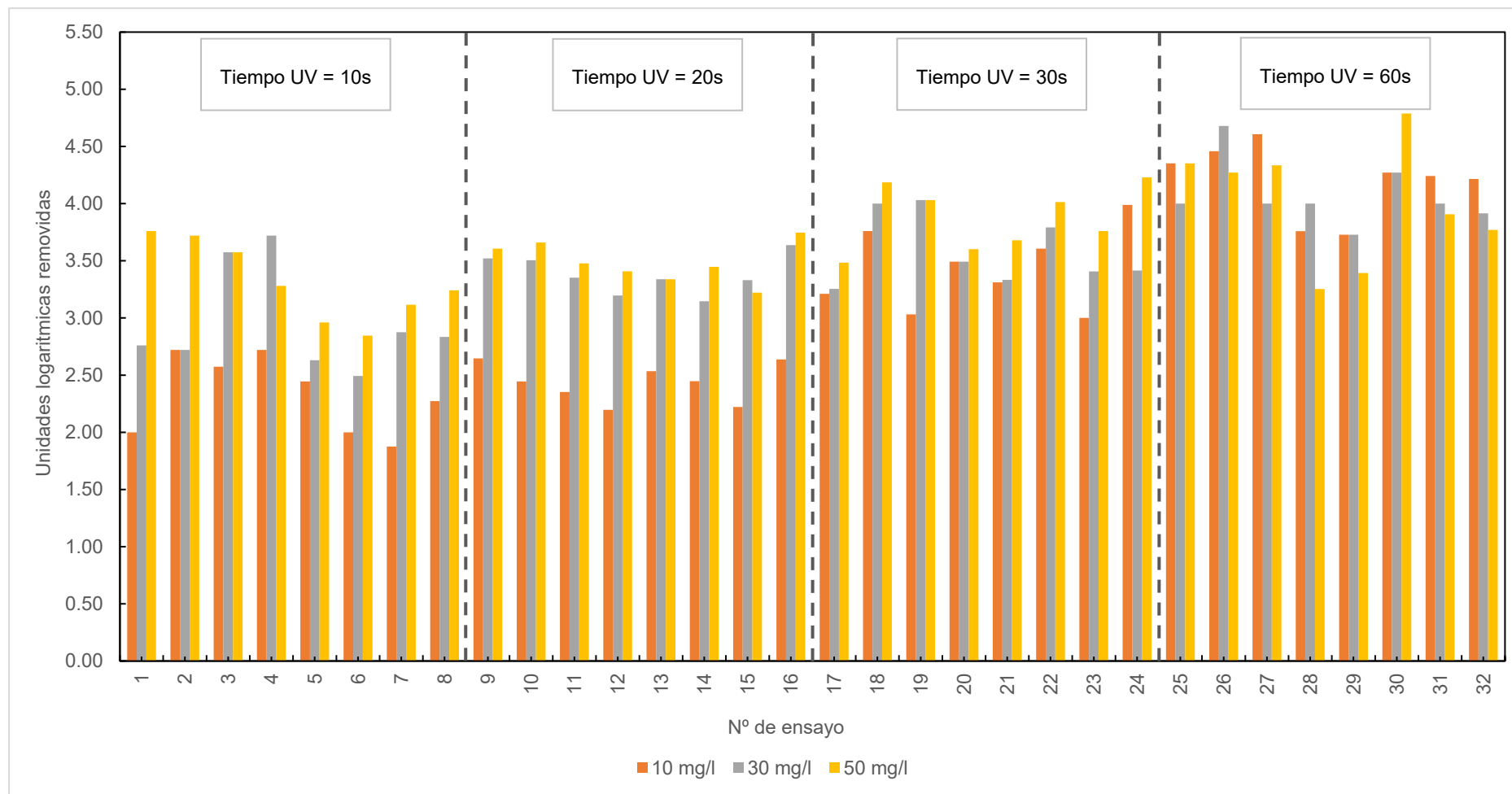
Remoción de Coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°02.



Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂O₂

Figura 48

Remoción total de coliformes termotolerantes Vs N° de ensayo – Configuración N°02.



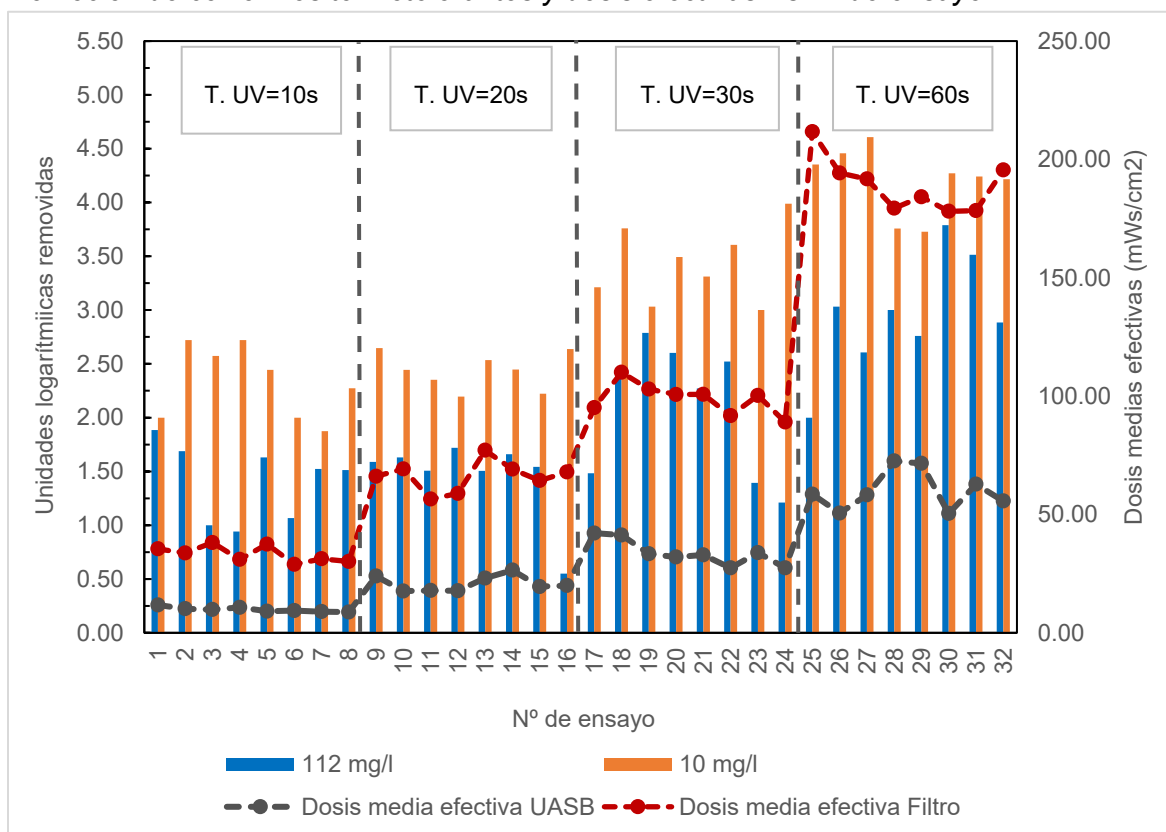
Nota: Las dosis del número de ensayo están indicadas en mg/l de H₂ O₂

5.8.3 Efecto de la dosis media efectiva en la eficiencias del tratamiento

En la Figura 45 se puede observar las dosis medias efectivas UV aplicadas a las muestras del reactor UASB y del Filtro de arena junto a las eficiencias de remoción de coliformes termotolerantes logradas con las dosis óptimas de peróxido de hidrógeno de cada configuración de tratamiento, las cuales corresponden a la dosis de 112 mg/l y 10 mg/l. Se puede observar que existe una correlación directa entre las dosis medias efectivas de radiación UV y las eficiencias de remoción. A medida que la dosis UV aumenta, se observa una mayor inactivación microbiana, obteniendo la máxima eficiencia de remoción promedio de 2.95 ± 0.55 unidades logarítmicas con una dosis UV efectiva de 60.03 ± 8.49 mWs/cm² y 4.20 ± 0.31 unidades logarítmicas con una dosis UV efectiva de 189.15 ± 11.58 mWs/cm² para las configuraciones de tratamiento N° 01 y 02 respectivamente.

Figura 49

Remoción de coliformes termotolerantes y dosis efectivas Vs N° de ensayo.



El análisis de los resultados muestra la relevancia de la determinación de las dosis efectivas, a partir de la intensidad de radiación aplicada de la fuente UV y la transmitancia de las muestras, debido a que permite conocer la intensidad o irradiancia UV real que fue usada en el tratamiento (Daniel, 2001). De lo contrario se podría suponer erróneamente que para un mismo tiempo de contacto y fuente UV las dosis serán iguales. Comparando la dosis efectiva promedio que obtuvo las mejores eficiencias en la configuración N°01 (60.03 mWs/cm^2) y la configuración N°02 (189.15 mWs/cm^2) con la dosis teórica (247.80 mWs/cm^2), se obtiene una diferencia del 75.77% y 23.67% respectivamente, mostrando que las muestras provenientes del Filtro de arena pudieron aprovechar una mayor cantidad de intensidad UV que las muestras del efluente del reactor UASB para un mismo tiempo de contacto, lo que explicaría las mayores eficiencias a pesar de la menor dosis de peróxido. Este incremento en las eficiencias probablemente se debió al aumento en la intensidad UV disponible la cual favoreció una conversión más eficiente del peróxido de hidrógeno en radicales hidroxilo, reduciendo su participación en reacciones secundarias no deseadas como pudo ser el caso de la dosis más alta (Primo Martínez, 2008).

5.9 Evaluación del cumplimiento de la normativa nacional

Se comparó los resultados de todos los parámetros obtenidos durante toda la investigación con los Límites máximos permisibles para los efluentes de PTARs domesticas o municipales (LMP) definidos en el decreto supremo N°003-2010-MINAM y los Estándares de calidad ambiental (ECA) en la categoría 3 y subcategoría D1 (Riego de vegetales, agua para riego no restringido), definidos en el decreto supremo N° 004-2017-MINAM, como referencia para evaluar la eficiencia del tratamiento.

Para los tiempos de contacto UV de 10 y 20 segundos, los efluentes de la configuración de tratamiento N°01 y 02, en términos del parámetro pH, temperatura y solidos suspendidos totales cumplen con los LMP. Sin embargo, respecto al parámetro de coliformes termotolerantes, solo la configuración N°02 cumplió con el LMP con las dosis de peróxido de hidrógeno de 30 y 50 mg/l. Respecto a los ECA los efluentes en términos de

pH, oxígeno disuelto y conductividad cumplen con lo indicado en la norma con excepción del ECA del parámetro de coliformes termotolerantes.

Para el tiempo de contacto UV de 30 segundos, los efluentes de la configuración de tratamiento N°01 y 02, en términos del parámetro pH, temperatura y sólidos suspendidos totales cumplen con los LMP. Sin embargo, respecto al parámetro de coliformes termotolerantes, solo la configuración N°02 cumplió con el LMP con las dosis de peróxido de hidrógeno de 10, 30 y 50 mg/l. Respecto a los ECA los efluentes en términos de pH, oxígeno disuelto y conductividad cumplen con lo indicado en la norma. Sin embargo, respecto al parámetro de coliformes termotolerantes, solo la configuración N°02 cumplió con el ECA con las dosis de peróxido de hidrógeno de 30 y 50 mg/l.

Finalmente, para el tiempo de contacto UV de 60 segundos, los efluentes de la configuración de tratamiento N°01 y 02, en términos del parámetro pH, temperatura, sólidos suspendidos totales y coliformes termotolerantes cumplen con los LMP. Respecto a los ECA los efluentes en términos de pH, oxígeno disuelto y conductividad cumplen con lo indicado en la norma. Sin embargo, respecto al parámetro de coliformes termotolerantes, solo la configuración N°02 cumplió con el ECA con las dosis de peróxido de hidrógeno de 10, 30 y 50 mg/l.

Conclusiones

La hipótesis planteada en la investigación si se cumplió, dado que la remoción del 99.99% de la concentración de coliformes termotolerantes en el efluente del reactor UASB se alcanzó mediante la combinación del proceso de filtración con el proceso UV/H₂O₂, logrando una remoción promedio de 4.20 unidades logarítmicas con una dosis de peróxido de hidrógeno igual a 10 mg/l y una dosis media efectiva UV de 189.15 mW/cm².

Se observó que la aplicación individual del proceso UV/H₂O₂ solo logró una remoción promedio de 2.95 unidades logarítmicas con una dosis de peróxido de hidrógeno igual a 112 mg/l y una dosis media efectiva UV de 60.03 mWs/cm².

La investigación demostró que la configuración de tratamiento N°01 conformado por la aplicación individual del proceso UV/H₂O₂ permite obtener una eficiencia de remoción promedio de coliformes termotolerantes entre 1.08 ± 0.28 y 3.18 ± 0.63 unidades logarítmicas, mientras que la configuración de tratamiento N°02 conformado por la combinación del proceso de filtración con el proceso UV/H₂O₂ permite obtener mejores eficiencias de remoción de coliformes termotolerantes con valores entre 2.33 ± 0.34 y 4.20 ± 0.31 unidades logarítmicas, empleando menores dosis de peróxido de hidrógeno.

El filtro de arena con características de lecho reducido empleado en la investigación, logro eficiencias de remoción del 85.61% y 88.21% en los parámetros de turbiedad y sólidos suspendidos totales respectivamente, provocando un incremento del 908.64% en la transmitancia y por ende mejorando la eficiencia del proceso UV/H₂O₂ aplicado posteriormente.

La incorporación del proceso de filtración previo permitió que la posterior aplicación del proceso UV/H₂O₂ logrará obtener remociones significativas de turbiedad con las dosis de peróxido de 10, 30 y 50 mg/l durante el tiempo de contacto UV de 60 segundos, resultando en eficiencias promedio entre el 15.13% y 18.61%.

Se determinó que el tratamiento UV/H₂O₂ posee la capacidad de remover solidos suspendidos totales, mientras mayor sea la dosis de peróxido de hidrógeno y el tiempo de

contacto UV, obteniendo eficiencias de remoción entre el 6.63% y 30.00%, siendo las mejores con el tiempo de contacto UV de 60 segundos y las dosis de 170 mg/l. Por el contrario, el tratamiento con el proceso de filtración previo obtuvo remociones negativas durante los primeros 30 segundos de exposición UV con las 03 dosis de peróxido. Obteniéndose únicamente una eficiencia promedio de remoción del 9.80% con la dosis de 50 mg/L y un tiempo de exposición a UV de 60 segundos.

El análisis de los parámetros fisicoquímicos evaluados, incluyendo pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto (OD), transmitancia y peróxido de hidrógeno residual, evidenció que el proceso de oxidación avanzada UV/H₂O₂ se llevó a cabo de manera efectiva. Las variaciones registradas en cada uno de estos parámetros reflejan las modificaciones fisicoquímicas inducidas a las muestras por el tratamiento, confirmando su influencia en la degradación de los compuestos presentes en el agua residual y sobre todo su efecto sobre los coliformes termotolerantes.

Con base a los resultados del estudio, se concluye que las muestras del efluente del reactor UASB tratadas mediante la configuración de tratamiento N°01, cumplen con los LMP en términos de los parámetros pH, temperatura y sólidos suspendidos totales. Sin embargo, en términos del parámetro coliformes termotolerantes, el cumplimiento del LMP solo se logra para las tres dosis de peróxido con un tiempo de contacto UV de 60 segundos

De manera similar, se concluye que las muestras del efluente del reactor UASB tratadas mediante la configuración de tratamiento N°02, cumplen con los LMP en términos de los parámetros pH, temperatura y sólidos suspendidos totales. En términos del parámetro coliformes termotolerantes, el cumplimiento del LMP se logra durante todos los tiempos de contacto UV con las dosis de 30 y 50 mg/l, mientras que con la dosis de 10 mg/l solo con los tiempos 20, 30 y 60 segundos. Demostrando que, aunque tiempos de contacto UV más cortos resulten en menores eficiencias de remoción de coliformes termotolerantes, es posible cumplir con los LMP desde los 10 segundos de exposición UV con la dosis de peróxido de 30 y 50 mg/l.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que las muestras tratadas con la configuración de tratamiento N°01, no cumplen con los ECA, en la categoría 3 y subcategoría D1 (Riego de vegetales, agua para riego no restringido) en términos del parámetro coliformes termotolerantes con ninguna dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de contacto UV.

En cuanto a los resultados obtenidos de la configuración de tratamiento N°02 compuesta por el filtro de arena y posterior aplicación del proceso UV/H₂O₂, los efluentes producidos con un tiempo de contacto UV de 30 segundos y las dosis de 30 y 50 mg/l, junto con los efluentes producidos con un tiempo de contacto UV de 60 segundos y las dosis de 10, 30 y 50 mg/l, cumplen con los Estándares de calidad ambiental (ECA) en la categoría 3 y subcategoría D1 (Riego de vegetales, agua para riego no restringido), en términos de los parámetros pH, oxígeno disuelto, conductividad y coliformes termotolerantes. Evidenciando que a pesar de que la dosis de 30 mg/l con un tiempo de contacto UV de 30 segundos no produzca las mejores eficiencias de remoción de coliformes termotolerantes, esta sería suficiente para cumplir con lo exigido en la norma.

Recomendaciones

Para mejorar la estabilidad del caudal en el proceso de filtración, se recomienda implementar un sistema de regulación automatizado del ingreso de agua residual al filtro, mediante un depósito regulador y no de manera manual como se realizó en la investigación.

Para garantizar una mayor precisión en la determinación del peróxido de hidrógeno residual, se recomienda utilizar métodos analíticos más exactos, como la volumetría redox utilizando permanganato de potasio.

Realizar investigaciones adicionales ajustando el pH del efluente del reactor UASB a rangos ácidos (2.0-3.0), para evaluar el impacto de esta modificación en la eficiencia de remoción de coliformes termotolerantes.

Continuar con la investigación evaluando otros parámetros clave, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), con el fin de determinar la eficiencia del proceso en la remoción de materia orgánica.

Se recomienda que investigaciones futuras, con enfoques similares, evalúen la remoción de otros parámetros microbiológicos además de los coliformes termotolerantes, como los huevos de helmintos u otros patógenos presentes en las aguas residuales.

Realizar una investigación similar empleando un filtro de arena con características de lecho filtrante diferentes al usado en la investigación como los filtros con lecho convencional y comparar sus eficiencias con las logradas en esta investigación.

Realizar más investigaciones empleando los procesos de oxidación avanzada que involucren la radiación UV, como los procesos UV/O₃ y UV/TiO₂, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Referencias bibliográficas

- Amaro Soriano, M. D. L. Á. (2022). *Tratamientos fotoquímicos (UV/H₂O₂, UV/O₃ y UV/H₂O₂/O₃) y de ósmosis inversa en aguas residuales* [Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/16072>
- Atoche Garay, D. F., Crivelenti Voltolini, L., Gaspar Bastos, R., & Fonseca Souza, C. (2021). Effect of turbidity on ultraviolet disinfection of domestic wastewater for agricultural reuse. *Revista Ambiente & Água*, 16, 1-12. Recuperado de: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2766>
- Baquero Guayacán, J. O. (2014). *Oxidación con peróxido de hidrógeno como pulimento del efluente de la Ptar "Pinares" Castilla La Nueva Meta* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Séneca. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/1992/61154>
- Becerra Moreno, D., Correa Jaimes, D., & Moreno Ochoa, Y. (2022). Reactores UASB como técnica para el tratamiento de contaminantes de aguas residuales y lixiviados. *Revista Ing-Nova*, 1(2), 215-226. Recuperado de: <https://doi.org/10.32997/rin-2022-4006>
- Castro-Peña, L., & Durán-Herrera, J. E. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes textiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Tecnología En Marcha*, 27(2), 40–50. Recuperado de: <https://doi.org/10.18845/tm.v27i2.1807>
- Comninellis, C. (1994). Electrocatalysis in the Electrochemical Conversion/Combustion of Organic Pollutants for Waste Water Treatment. *Electrochimica Acta*, 39(11), 1857-1862. Recuperado de: [doi:10.1016/0013-4686\(94\)85175-1](https://doi.org/10.1016/0013-4686(94)85175-1)
- Correa, M., Mera, S., Guacho, F., Villarreal, E., & Valencia, S. (2020). Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia

- preventiva ante la COVID-19 . *Revista Minerva de Investigación Científica*, 1(2), 46-53. Recuperado de: <https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.11>
- Cruz Montes, A. (2015). *Tratamiento fotoquímico de aguas residuales urbanas de la ciudad de Huachinango, Puebla y su analisis microbiológico* [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional Buap. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/8215>
- Daniel, L. A. (2001). *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. ABES.
- Decreto Supremo N°003-2010-MINAM. Por el cual se aprueban los Limites Maximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. 17 de marzo del 2010. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Decreto Supremo N°004-2017-MINAM. Por el cual se aprueban los Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. 07 de junio del 2017. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Feng, Z., Xue, R., & Ge, L. (2021). A Brief Talk of the Disinfection Process for Reclaimed Water. *E3S Web of Conferences*, 271, 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127104002>
- García Suescun, I. (2010). *Aplicación de tratamientos basados en ozono en la regeneración de aguas residuales. Estudio de la degradación de sustancias peligrosas* [Tesis de pregrado, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional UNIZAR. Recuperado de: <https://zaguan.unizar.es/record/4715>
- Gelete, G., Gökçekuş, H., Uzun, B., Uzun Ozsahin, D., & Gichamo, T. (2021). Evaluating Disinfection Techniques of Water Treatment Using Multi-criteria Decision-Making Method. En D. Uzun Ozsahin, H. Gökçekuş, B. Uzun, & J. LaMoreaux (Eds.), *Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil*

Engineering (pp. 101-111). Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-64765-0_12

Gómez Dunkley, G. J. (2018). *Diseño de un filtro para reducir la turbidez de aguas residuales utilizando material litológico como medio filtrante* [Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio Institucional UG. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/33217>

Lanuza Val, A. (2012). *Formación de subproductos en procesos de oxidación avanzada aplicados en la regeneración de aguas residuales de salida de depuradora* [Tesis de pregrado, Universidad de Zaragoza]. Repositorio Institucional UNIZAR. Recuperado de: <https://zaquan.unizar.es/record/8842>

Larrea-Murrell, J. A., Rojas-Badía, M. M., Romeu-Álvarez, B., Rojas-Hernández, N. M., & Heydrich-Pérez, M. (2013). Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(3), 24-34. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181229302004>

Lazarotto, J. S., Júnior, E. P. M., Medeiros, R. C., Volpato, F., & Silvestri, S. (2022). Sanitary sewage disinfection with ultraviolet radiation and ultrasound. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 11531-11538. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03764-7>

Marques, A. (2003). *Desinfecção de Efluentes Provenientes de Lagoa Anaeróbica com o Uso de Ultravioleta e Peróxido de Hidrogênio* [Tesis de Maestría, Universidade Estadual de Campinas]. Repositorio Institucional Unicamp. Recuperado de: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2003.930781>

Mayo Clinic. (1 de octubre de 2022). E. coli. Recuperado de: <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/e-coli/symptoms-causes/syc-20372058>

Metcalf & Eddy (2014). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (5.ª ed.). McGraw-Hill.

- Meza Pinedo, M. (2019). *Uso del filtro de arena para la remoción de coliformes termotolerantes presentes en los desagües domésticos pretratados* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Cybertesis UNI. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/19036>
- Obregón Ramírez, A. (2017). *Evaluación de la eficiencia de un proceso de oxidación avanzada para la desinfección del agua del río Otún en el sistema de potabilización para el consumo de la ciudad de Pereira Hidrogênio* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio Institucional UTP. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/11059/7878>
- Ocampo-Rodríguez, D.B., Vázquez-Rodríguez, G.A., Martínez-Hernández, S., Iturbe-Acosta, U., Coronel-Olivares, C. (2022). Desinfección del agua: una revisión a los tratamientos convencionales y avanzados con cloro y ácido peracético. *Ingeniería del Agua*, 26(3), 185-204. Recuperado de: <https://doi.org/10.4995/la.2022.17651>
- Ponce Ochoa, E. (2005). *Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada* [Tesis de Titulación, Universidad de las Américas Puebla]. Repositorio Institucional UDLAP. Recuperado de: https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/ponce_o_e/
- Purschke, M., Elsamaloty, M., Wilde, J. P., Starr, N., Anderson, R. R., Farinelli, W. A., Sakamoto, F. H., Tung, M., Tam, J., Hesselink, L. & Baer, T. M. (2020). Construction and validation of UV-C decontamination cabinets for filtering facepiece respirators. *Applied Optics*. 59, 7585-7595. Recuperado de <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.12670826>
- Primo Martínez, O. (2008). *Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada* [Tesis doctoral, Universidad de Cantabria]. Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10803/10692>
- Reyes Prado, M. A. (2020). *Recuperación de nutrientes de aguas residuales agrícolas de Sinaloa mediante un sistema de tratamiento sustentado en un proceso de oxidación*

- avanzada* [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Culiacán]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. Recuperado de: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/978>
- Reyes López, M. G. (2016). *Uso del cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas: desinfección y formación de subproductos* [Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio Digital IPN. Recuperado de: <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/23350>
- Rizvi, H., Ahmad, N., Yasar, A., Bukhari, K., & Khan, H. (2013). Disinfection of UASB-Treated Municipal Wastewater by H₂O₂, UV, Ozone, PAA, H₂O₂/Sunlight, and Advanced Oxidation Processes: Regrowth Potential of Pathogens. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 1153-1161. Recuperado de: <https://www.pjoes.com/Disinfection-of-UASB-Treated-Municipal-r-nWastewater-by-H-2-O-2-UV-Ozone-PAA-r-nH.89074,0,2.html>
- Rodriguez Peña, M., & Barrera Díaz, C. E. (2020). *Procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de agua* (1.^a ed.). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Rodriguez Urviola, W. K., & Neira Paniura, A. N. (2020). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada, método combinado–UV/H₂O₂, como propuesta de mitigación a nivel piloto para el tratamiento de aguas residuales vertidas por la industria alimentaria en Umapalca, Sabandía* [Tesis de Titulación, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12773/11567>
- Rojas Torres, J. (2020). *Reducción de coliformes termotolerantes por filtros de arena en serie de flujo ascendente* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Cybertesis UNI. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/21840>
- Romero Rojas, J. R. (2010). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Rosas Bustamante, R. M. & Ugaz Saavedra, J. M. (2020). *Tratamiento de aguas residuales por medio de filtros de arena para la remoción de coliformes termotolerantes* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional Cybertesis UNI. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.14076/4483>
- Souza, J. B., de Vidal, C. M. S., Cavallini, G. S., Quartaroli, L., & Marcon, L. R. C. (2012). Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, 33(2), 117–126. Recuperado de: <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2012v33n2p117>.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras 2022*. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/sunass/informes-publicaciones/3087490-diagnosticos-de-las-ptar-en-el-ambito-de-las-empresas-prestadoras>
- United States Environmental Protection Agency. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales - Desinfección con luz Ultravioleta*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/septic/wastewater-technology-fact-sheets>
- Yasar, A., Ahmad, N., Latif, H., & Amanat Ali Khan, A. (2007). Pathogen Re-Growth in UASB Effluent Disinfected By UV, O₃, H₂O₂, and Advanced Oxidation Processes. *Ozone: The Journal of the International Ozone Association*, 29(6), 485-492. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/01919510701617710>

Anexos

	Pág
Anexo 1: Panel fotográfico.....	1
Anexo 2: Cálculo de la intensidad media aplicada del reactor	7
Anexo 3: Cálculo de la tasa de filtración del filtro de arena	8

Anexo 1: Panel fotográfico

Fotografía 1

Recolección de muestra del efluente del reactor UASB.



Fotografía 2

Vista en planta del reactor fotoquímico.



Fotografía 3

Proceso de filtración de la muestra del reactor UASB.



Fotografía 4

Adición del peróxido de hidrógeno a la muestra.



Fotografía 5

Colocación de la muestra con reactivo en el reactor fotoquímico.



Fotografía 6

Muestras listas para el transporte al LIA.



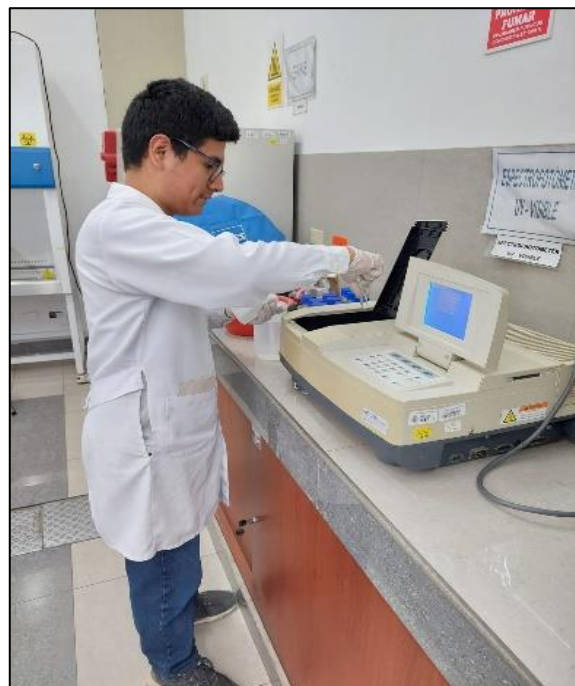
Fotografía 7

Medición de parámetros fisicoquímicos en CITRAR-FIA-UNI.



Fotografía 8

Medición de transmitancia con espectrofotómetro UV-Vis.



Fotografía 9

Proceso de esterilización de medios de cultivo.



Fotografía 10

Ensayo de coliformes termotolerantes usando técnica de fermentación en tubos múltiples.



Fotografía 11

Colocación de tubos inoculados en incubadora a 35 °C.



Fotografía 12

Colocación de tubos en baño maría a 44.5 °C.



Anexo 2: Cálculo de la intensidad media aplicada del reactor

La intensidad UV media aplicada a la superficie del reactor, emitida por el conjunto de lámparas (I_o) se calculó mediante una aproximación teórica. Según Purschke et al. (2020), la irradiancia directa de una lámpara UV sobre una superficie puede estimarse a partir de la ecuación simplificada de Keitz (Ecuación 6), para todos los casos en los que $L/R > 20$ y $D/r < 15$.

$$I'_o = \frac{P}{4 \pi x L x D} \quad (6)$$

Donde:

I'_o = Intensidad media aplicada (W/cm²)

P = Potencia efectiva de radiación UV (W)

L = Longitud de las lámparas UV (cm)

R = Radio de las lámparas UV (cm)

D = Distancia al punto de aplicación (cm)

A partir de esto, se puede calcular la intensidad media aplicada total del reactor I_o , sumando las intensidades individuales de cada lámpara UV respecto a un mismo punto (Purschke et al., 2020).

Se calculó la irradiancia media aplicada del conjunto de lámparas UV en un punto ubicado en el centro del reactor. Para ello, se consideraron las distancias de cada lámpara a dicho punto, junto con los datos proporcionados por el fabricante sobre las características de las lámparas UV-C. Estos valores fueron sustituidos en la Ecuación (6), obteniendo finalmente una I_o aproximada igual a 4.13 mW/cm² como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Cálculo de la intensidad UV media aplicada.

	L (cm)	R (cm)	P nominal (W)	P efectiva (W)	D	L/R >20	D/R <15	I'_o	
Lampara 1	45.00	1.4	15.00	5.10	15.91	32.14	11.36	0.567	mW/cm2
Lampara 2	45.00	1.4	15.00	5.10	12.98	32.14	9.27	0.695	mW/cm2
Lampara 3	45.00	1.4	15.00	5.10	11.24	32.14	8.03	0.802	mW/cm2
Lampara 4	45.00	1.4	15.00	5.10	11.24	32.14	8.03	0.802	mW/cm2
Lampara 5	45.00	1.4	15.00	5.10	12.98	32.14	9.27	0.695	mW/cm2
Lampara 6	45.00	1.4	15.00	5.10	15.91	32.14	11.36	0.567	mW/cm2
Total I_o									4.13 mW/cm2

Anexo 3: Cálculo de la tasa de filtración del filtro de arena

Para determinar la tasa de filtración aproximada del filtro de arena, fue necesario conocer el caudal de ingreso del agua residual. Para estimarlo, se utilizó el mismo depósito con orificios de ingreso del agua residual empleado en la investigación, el cual se llenó con agua potable, manteniendo manualmente una altura constante de 3 cm, mientras se recolectaba el efluente en un recipiente, midiendo el tiempo requerido para alcanzar un volumen de 10 litros en el recipiente de recolección previamente marcado para facilitar la lectura. Este procedimiento se repitió 8 veces, obteniendo finalmente un caudal promedio de 0.482 m³/día, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2

Estimación del caudal de ingreso al filtro de arena.

Volumen (L)	Tiempo (min)	Caudal (L/min)	Caudal (m ³ /día)
10.00	33.29	0.300	0.433
10.00	32.33	0.309	0.445
10.00	32.43	0.308	0.444
10.00	27.78	0.360	0.518
10.00	25.11	0.398	0.573
10.00	31.13	0.321	0.463
10.00	30.44	0.329	0.473
10.00	28.57	0.350	0.504
Promedio			0.482

Según Rojas Torres (2020) la tasa de filtración aproximada se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Donde:

t = Tasa de filtración (m³/m²/día)

Q = Caudal de ingreso al filtro (m³/día)

A = Área superficial del filtro de arena (m²)

Con el caudal de ingreso al filtro hallado y sabiendo que el filtro de arena cuenta con un diámetro de 29 cm se reemplaza los valores en la Ecuación (7), obteniendo finalmente que el filtro de arena opero con una tasa de filtración aproximada de 7.29 m³/m²/día.