

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA
EN UN REACTOR AEROBIO DE LECHO MÓVIL UTILIZANDO
TUBERÍA DE PVC CORRUGADA COMO PORTADOR”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

JOHANN MARTÍN ROJAS FLOREANO

ASESOR:

ING. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mi mamá Clorinda y mi papá Andrés, por su amor, guía, consejos y apoyo inmensurables; a mi hermano Jonathan, a mi hermana Estela, Cesar y mi sobrino Augustito.

Johann Martín

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Otto Rosasco Gerkes por sus consejos, asesoría, dirección y por todo lo aprendido a lo largo del desarrollo de la presente investigación.

Al CITRAR-UNI: Dra. Rosa Yaya, Ing. Yon Cecilio, Ing. Litza Jara, Luz Marina, Manuel, Ramses y todos los amigos tesistas y brigadistas, por su importante apoyo y con quienes se formó una gran familia, compartí muchos momentos especiales y aprendí mucho.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, la FIA-UNI y el Laboratorio de Investigación del Agua.

RESUMEN

La investigación fue diseñada para evaluar, a escala de laboratorio, el desempeño de cuatro reactores aerobios de biopelícula de lecho móvil (MBBRs por sus siglas en inglés) para la remoción de carga orgánica, utilizando cuatro porcentajes de llenado en los MBBRs (5%, 10%, 20% y 40%) con tuberías de PVC corrugadas como lechos móviles alternativos, los cuales fueron seleccionados por tener características como ser ligeros, resistentes, de buena capacidad de adherencia (superficie específica de $267.112\text{m}^2/\text{m}^3$) y de bajo costo.

La parte experimental fue desarrollada en Lima. Se implementaron dos MBBRs de 84L y sus sedimentadores secundarios de 32.5L cada uno y de funcionamiento en paralelo. Se dividió en tres etapas con una duración total de 56 semanas. La etapa de acondicionamiento (13 semanas) comprendió las actividades de implementación del sistema y las pruebas iniciales, mientras que en las etapas N°01 (24 semanas) y N°02 (19 semanas) se investigaron a los MBBRs con porcentajes de llenados de 5%-10% y 20%-40% respectivamente y se desarrollaron las pruebas principales de la investigación. El afluente al sistema fue agua residual doméstica pre-tratada, el caudal de operación fue 216 L/d y los principales parámetros evaluados fueron DBO_5 , DQO, SST, SSV, SSF, nutrientes, sólidos adheridos al lecho móvil, turbiedad, pH, temperatura y O.D.

En la Etapa N°01, se trabajó bajo una COV media de 0.34 ± 0.06 $\text{kgDBO}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y COS medias de 25.59 ± 4.53 y 12.80 ± 2.26 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en los MBBRs con porcentajes de llenados de 5% y 10% y se alcanzaron eficiencias promedios de remoción de $86 \pm 5\%$ y $84 \pm 7\%$ respectivamente; y en la Etapa N°02, se trabajó bajo una COV media de 0.41 ± 0.05 $\text{kgDBO}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y COS medias de 7.71 ± 0.93 y 3.85 ± 0.46 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en los MBBRs con porcentajes de llenados de 20% y 40% y alcanzaron eficiencias promedios de remoción de $86 \pm 12\%$ y $88 \pm 10\%$ respectivamente. Se apreció la buena adherencia de la biopelícula a los lechos móviles, con tasas de FBA de hasta 29.55 gSST/m^2 . Se concluyó que, en los diseños de los MBBRs, la fracción óptima de llenado para los lechos móviles es variable y una consecuencia dependiente de las COV y COS a ser aplicadas.

ABSTRACT

The research was designed to evaluate, on a scale of laboratory, the behaviour of four Moving Bed Biofilm Reactors (MBBRs) to the removal of organic loadings, using four percents of filling in the MBBRs (5%, 10%, 20% and 40%) with corrugated tubes of PVC as alternative moving beds, which were selected because of having qualities like being light, tough, of good capacity of attachment (specific surface area of $267.112 \text{ m}^2/\text{m}^3$) and being cheap.

The experimental part was developed in Lima. It was implemented two MBBRs of 84L and their secondary sedimentation tanks of 32.5L, each one and parallel working. It was divided in three stages with a whole duration of 56 weeks. The stage of preparation (13 weeks) performed the activities of implementation of system and the beginning tests, while in the stage N°01 (24 weeks) and in the stage N°02 (19 weeks) were researched the MBBRs with filling percents of 5%-10% and 20%-40% respectively and were developed the main tests of the research. The influent to the system was pre-treated domestic wastewater, the operative flow was 216 L/d and the main parameters evaluated were BOD₅, COD, TSS, VSS, FSS, nutrients, attached solids, turbidity, pH, temperature and dissolved oxygen.

In the stage N°01, it was worked under an average Organic Volumetric Loading (OVL) of $0.34 \pm 0.06 \text{ kgBOD}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ and average Organic Surfacing Loadings (OSL) of 25.59 ± 4.53 and $12.80 \pm 2.26 \text{ gDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ in the MBBRs with filling percents of 5% y 10% and achieved average removal efficiencies of $86 \pm 5\%$ and $84 \pm 7\%$ respectively; and in the stage N°02, it was worked under an average OVL of $0.41 \pm 0.05 \text{ kgDBO}_5/\text{m}^3\cdot\text{d}$ and average OSLs of 7.71 ± 0.93 and $3.85 \pm 0.46 \text{ gDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ in the MBBRs with filling percents of 20% y 40% and achieved average removal efficiencies of $86 \pm 12\%$ and $88 \pm 10\%$ respectively. It was noticed the good capacity of attachment on the carriers with rates of Attached biomass growth until $29.55 \text{ gTSS}/\text{m}^2$. It was concluded that in the design of MBBRs, the optimum fraction of filling to the carriers is variable and a dependent consequence of the OVL and OSL to be applied.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2. ANTECEDENTES	2
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
2.1.1 Identificación del problema	6
2.1.2 Formulación del problema	6
2.1.3 Justificación de la investigación.....	7
2.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
2.2.1 Objetivo general	8
2.2.2 Objetivos específicos.....	8
2.3 HIPÓTESIS	9
2.4 VARIABLES DE ESTUDIO.....	9
2.4.1 Variables independientes	9
2.4.2 Variables dependientes	9
2.4.3 Variables intervinientes.....	10
2.5 MARCO LEGAL.....	10
CAPITULO 3. FUNDAMENTO TEÓRICO	11
3.1 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES	11
3.1.1 Proceso aerobio	12
3.1.2 Nitrificación y desnitrificación.....	13
3.2 REACTORES Y SUS MODELOS.....	14
3.2.1 Reactor de flujo continuo y mezcla completa.....	14
3.2.2 Reactor de lecho fluidizado o móvil	14

3.3	PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	14
3.4	PROCESOS DE BIOPELÍCULA	16
3.4.1	Biopelícula.....	16
3.4.2	Formación de la biopelícula.....	17
3.4.3	Comportamiento de la biopelícula en la depuración	18
3.5	DESCRIPCIÓN DEL REACTOR DE BIOPELÍCULA DE LECHO MÓVIL (MBBR)	19
3.5.1	Composición de la biomasa en un MBBR.....	21
3.5.2	Ventajas frente a procesos biológicos convencionales	21
3.5.3	Características del lecho móvil para la biopelícula.....	22
3.6	PRINCIPALES PARÁMETROS DE CONTROL DEL MBBR	23
3.6.1	Cargas contaminantes.....	23
3.6.2	Concentración de oxígeno disuelto en el reactor	24
3.6.3	Relación Alimento/Microorganismo (F/M)	25
3.6.4	Otros parámetros de operación y control	26
CAPITULO 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		27
4.1	UBICACIÓN	27
4.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y CRITERIOS DE DISEÑO	27
4.2.1	Unidades de Captación, Pre-tratamiento y bombeo.....	30
4.2.2	Tanque de homogenización.....	32
4.2.3	Dispositivo regulador de caudal.....	33
4.2.4	Reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR)	34
4.2.5	El Lecho móvil portador de la biopelícula	35
4.2.6	Sistema de aireación	38
4.2.7	Sedimentador secundario y disposición final	39
4.3	CRONOGRAMA DE TRABAJO DESARROLLADO	40
4.4	PRUEBAS REALIZADAS	41
4.4.1	Pruebas iniciales	41
4.4.2	Pruebas de calibración	43
4.4.3	Observaciones en el microscopio	46
4.4.4	Determinación de la biomasa adherida en los lechos móviles	46
CAPITULO 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN		48
5.1	MEDICIONES DEL CAUDAL AFLUENTE A LOS MBBRs	48
5.2	DETERMINACIÓN DEL K_{La} Y CAPACIDAD DE OXIGENACIÓN	51

VII

5.3	MEDICIONES DEL CAUDAL DE AIREACIÓN	52
5.4	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES	54
5.5	MEDICIONES DE LA TURBIEDAD	56
5.6	MEDICIONES DEL PH	59
5.7	MEDICIONES DE LA TEMPERATURA	63
5.8	MEDICIONES DEL OXIGENO DISUELTO	67
5.9	MEDICIONES DE LA DBO ₅	71
5.10	MEDICIONES DE LA DQO.....	78
5.11	MEDICIONES DEL NTK, NITRITOS Y NITRATOS	84
5.12	MEDICIONES DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.....	87
5.13	MEDICIONES DE LOS SÓLIDOS ADHERIDOS A LOS LECHOS MÓVILES	95
5.14	DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA TOTAL EN LOS MBBRs	99
5.15	OBSERVACIONES EN EL MICROSCOPIO	101
CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....		105
CAPITULO 7. RECOMENDACIONES.....		107
CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....		108
CAPITULO 9. ANEXOS		112
9.1	ANEXO N°01: Registro de mediciones diarias: turbiedad, pH, O.D., temperatura, caudales y horarios de bombeo.	112
9.2	ANEXO N°02: Registro de las mediciones semanales de la DBO ₅ , DQO y cargas contaminantes	130
9.3	ANEXO N°03: Registro de las mediciones semanales de los Solidos Suspendidos	132
9.4	ANEXO N°04: Registro de las mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores	134
9.5	ANEXO N°05: Panel fotográfico	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema del proceso de lodos activados convencional.....	15
Figura 3.2. Representación esquemática de una sección de biopelícula.....	17
Figura 3.3. Esquema de las etapas de formación de la biopelícula.....	18
Figura 3.4. Mecanismos y procesos envueltos en el transporte y degradación de sustratos en la biopelícula.....	19
Figura 3.5. El reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil.....	20
Figura 3.6. Diagrama típico del proceso de biopelícula con lecho móvil para remoción de carga orgánica.....	21
Figura 4.1. Ubicación de la Unidad de Investigación dentro de las instalaciones de CITRAR-UNI.....	27
Figura 4.2. Diagrama de flujo de las unidades de pre-tratamiento del CITRAR-UNI.....	28
Figura 4.3. Diagrama de flujo de la Unidad de Investigación Tesis MBBR.....	28
Figura 4.4. Esquema típico de los MBBRs implementados para la investigación.....	29

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 4.1. Unidades de pre-tratamiento de CITRAR-UNI.....	31
Fotografía 4.2. Captación e impulsión del desagüe pretratado hacia la Unidad de Investigación.....	31
Fotografía 4.3. Detalles del lecho móvil portador de la biopelícula utilizado en la investigación (medidas en mm).....	36
Fotografía 5.1. Imágenes de los lechos móviles al final de la Etapa N°01 (Izquierda: R5% y R10%) y Etapa N°02 (Derecha: R20% y R40%).....	99
Fotografía 9.1. Vista frontal de la Unidad de Investigación.....	136
Fotografía 9.2. MBBRs y sedimentadores secundarios experimentales implementados para la investigación – Vista de perfil.....	136
Fotografía 9.3. Vista lateral de la Unidad de Investigación.....	137
Fotografía 9.4. MBBRs y sedimentadores secundarios experimentales implementados para la investigación – Vista frontal.....	138

Fotografía 9.5. MBBRs experimentales en funcionamiento (derecha: R5%; izquierda: R10%) - Final de etapa N°01	138
Fotografía 9.6. Sedimentadores secundarios experimentales en funcionamiento (derecha: E5%; izquierda: E10%) - Final de etapa N°01	139
Fotografía 9.7. MBBRs experimentales en funcionamiento (abajo: R20%; arriba: R40%) - Final de etapa N°02	139
Fotografía 9.8. Sedimentadores secundarios experimentales en funcionamiento (abajo: E20%; arriba: E40%) - Final de etapa N°02	140
Fotografía 9.9. Unidad de investigación y tesista.....	140

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1. Variación del caudal afluente a los MBBRs durante la investigación	50
Gráfico 5.2. Determinación del coeficiente global de transferencia de oxígeno (KLa) en los reactores.....	51
Gráfico 5.3. Variación del caudal de aireación suministrado a los reactores	53
Gráfico 5.4. Variación de la concentración del trazador NaCl medida como conductividad en el reactor N°01 y el reactor N°02.....	54
Gráfico 5.5. Variación de la Turbiedad y eficiencias alcanzadas en el afluente y los efluentes durante las etapas N°01 y N°02	58
Gráfico 5.6. Variación del pH en el afluente y los efluentes durante las etapas N°01 y N°02.....	61
Gráfico 5.7. Variación del pH en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02 ..	62
Gráfico 5.8. Variación de la Temperatura ambiental, de los afluentes y efluentes durante las etapas N°01 y N°02.....	65
Gráfico 5.9. Variación de la Temperatura en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02.....	66
Gráfico 5.10. Variación del Oxígeno disuelto en el afluente y los efluentes durante las etapas N°01 y N°02.....	69
Gráfico 5.11. Variación del Oxígeno disuelto en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02.....	70
Gráfico 5.12. Variación de la remoción de COV aplicada en los MBBRs (en términos de la DBO ₅)	74

Gráfico 5.13. Variación de la remoción de COS aplicada en los MBBRs (en términos de la DBO ₅).....	76
Gráfico 5.14. Variación de la DBO ₅ en el afluente y efluentes y eficiencias alcanzadas durante las Etapa N°01 y N°02	77
Gráfico 5.15. Variación de la remoción de COV aplicada en los MBBRs (en términos de la DQO).....	81
Gráfico 5.16. Variación de la remoción de COS aplicada en los reactores (en términos de la DQO).....	82
Gráfico 5.17. Variación de la DQO en los afluentes y efluentes VS eficiencias de remoción alcanzadas durante las Etapas N°01 y N°02.....	83
Gráfico 5.18. Variación del porcentaje de la remoción de Carga superficial aplicada en los MBBRs (en terminos del NTK)	86
Gráfico 5.19. Variación de los SS en el afluente durante las Etapas N°01 y N°02	91
Gráfico 5.20. Variación de los SST en los afluentes y efluentes versus Eficiencias de remoción de SST alcanzadas en las Etapas N°01 y N°02	92
Gráfico 5.21. Variación de los SST en los MBBRs durante las Etapas N°01 y N°02	93
Gráfico 5.22. Variación de los SSV en los MBBRs durante las Etapas N°01 y N°02	94
Gráfico 5.23. Comparación de la Tasa de Formación de Biomasa Adherida a los lechos móviles (FBA) en cada MBBR	96
Gráfico 5.24. Comparación de la Tasa de FBA a los lechos móviles y la COS en términos de la DQO aplicada a los reactores.....	97
Gráfico 5.25. Concentración promedio de Sólidos adheridos (a los portadores) en los MBBRs.....	98
Gráfico 5.26. Concentración promedio de la Biomasa total (como Sólidos Suspendidos) en los MBBRs	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. COVs aplicadas a MBBRs en otras investigaciones	4
Tabla 2.2. Cargas Orgánicas Superficiales aplicadas en otras investigaciones...5	5
Tabla 3.1. Requisitos que deben tener los lechos móviles para la biopelícula...23	23

Tabla 4.1. Horarios de llenado del tanque de homogenización durante la investigación.....	33
Tabla 4.2. Especificaciones del material utilizado para la fabricación de los lechos móviles portadores de la biopelícula en la investigación	36
Tabla 4.3. Medidas estándar de los lechos móviles utilizados en la investigación	37
Tabla 4.4. Disposición de los lechos móviles dentro de los reactores durante la investigación.....	37
Tabla 4.5. Especificaciones técnicas de la compresora de aire	38
Tabla 4.6. Detalles del Cronograma desarrollado en la investigación.....	41
Tabla 4.7. Pruebas iniciales realizadas en la investigación	42
Tabla 4.8. Puntos de muestreo y sus abreviaturas en cada etapa de la investigación.....	44
Tabla 4.9. Pruebas de laboratorio realizadas en la investigación	45
Tabla 5.1. Resumen de las mediciones de caudal afluente a los MBBRs.....	48
Tabla 5.2. Detalles de las pruebas y determinación de la capacidad de oxigenación de la compresora en los reactores	52
Tabla 5.3. Resultados de las mediciones del caudal de aireación suministrado a los reactores durante la investigación	53
Tabla 5.4. Detalles de los ensayos de trazadores realizados a los reactores durante la etapa de acondicionamiento del sistema.....	54
Tabla 5.5. Resumen de resultados del análisis de la curva tendencia de variación de la concentración del trazador en los reactores.....	55
Tabla 5.6. Valores promedio de la turbiedad en los afluentes, reactores y efluentes y eficiencias de remoción alcanzadas.....	56
Tabla 5.7. Valores promedio, máximos y mínimos del pH en los afluentes, reactores y efluentes	59
Tabla 5.8. Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura del ambiente, afluentes, reactores y efluentes	63
Tabla 5.9. Valores promedio, máximos y mínimos del Oxígeno Disuelto en los afluentes, reactores y efluentes	67
Tabla 5.10. Resumen de las mediciones de la DBO ₅ y las eficiencias de remoción alcanzadas durante la investigación	71

Tabla 5.11. Resumen de las cargas orgánicas aplicadas a los MBBRs durante la investigación (en términos de la DBO ₅).....	73
Tabla 5.12. Resumen de las mediciones de la DQO durante la investigación ...	78
Tabla 5.13. Resumen de las cargas orgánicas aplicadas durante la investigación (en términos de la DQO).....	80
Tabla 5.14. Resultados de las mediciones de NTK, Nitritos, Nitratos y Nitrógeno Total en la investigación	84
Tabla 5.15. Resultados de la remoción de carga superficial de NTK aplicada a los reactores y factores determinantes.....	86
Tabla 5.16. Resumen de las mediciones de Sólidos Suspendidos durante la Etapa N°01	87
Tabla 5.17. Resumen de las mediciones de Sólidos Suspendidos durante la Etapa N°02	88
Tabla 5.18. Resultados de las mediciones de los Sólidos suspendidos adheridos a los lechos móviles (portadores de la biopelícula) utilizados en la investigación	95
Tabla 5.19. Biomasa total promedio (como SS) en los MBBRs	99
Tabla 5.20. Imágenes y descripciones estimadas de los principales microorganismos encontrados en los MBBRs (biopelícula y floc)	102
Tabla 9.1. Registro de mediciones diarias de Turbiedad, pH y O.D. en la Etapa N°01	112
Tabla 9.2. Registro de mediciones diarias de Temperatura en la Etapa N°01 .	116
Tabla 9.3. Registro de mediciones diarias de Turbiedad, pH y O.D. en la Etapa N°02	118
Tabla 9.4. Registro de mediciones diarias de Temperatura en la Etapa N°02 .	121
Tabla 9.5. Registro de mediciones diarias de caudal en la Etapa N°01	123
Tabla 9.6. Registro de mediciones diarias de caudal en la Etapa N°02.....	126
Tabla 9.7. Registro de horarios de bombeo de agua residual en la Etapa N°01	128
Tabla 9.8. Registro de horarios de bombeo de agua residual en la Etapa N°02	129
Tabla 9.9. Registro de mediciones semanales de la DBO ₅ , DQO y cargas contaminantes en la Etapa N°01.....	130

Tabla 9.10. Registro de mediciones semanales de la DBO5, DQO y cargas contaminantes en la Etapa N°02.....	131
Tabla 9.11. Registro de mediciones semanales de los Sólidos suspendidos en la Etapa N°01	132
Tabla 9.12. Registro de mediciones semanales de los Sólidos suspendidos en la Etapa N°02	133
Tabla 9.13. Registro de mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores al final de la Etapa N°01	134
Tabla 9.14. Registro de mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores al final de la Etapa N°02	135

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En el Perú existe un gran déficit en la cobertura de tratamiento de aguas residuales y en la operación de las plantas de tratamiento existentes. Parte de las causas principales de esta problemática son: la falta de mayor investigación y desarrollo tecnológico adaptado a la realidad nacional, así como también un déficit de financiamiento para el tratamiento de aguas residuales, resultando esto en un bajo porcentaje de volumen de aguas residuales tratadas (promedio nacional de 78.59%, SUNASS, 2017) y el incumplimiento de la normativa actual como son los Estándares de Calidad del Agua y los Límites Máximos Permisibles.

Frente a esta situación, se presenta la siguiente tesis, a fin de continuar con las investigaciones que permitan mejorar el nivel de tratamiento de las aguas residuales en nuestro país, en base al desarrollo de nuevas tecnologías para que las nuevas plantas de tratamiento puedan ser construidas en menor espacio y las existentes tengan una alternativa para que logren incrementar sus capacidades de tratamiento, y que los costos de inversión, operación y mantenimiento sean bajos.

En la actualidad y durante las dos últimas décadas existe un creciente interés en los procesos de biopelícula que se desarrolla adherida sobre un material portador suspendido y en movimiento en un tanque de aireación para el tratamiento de aguas residuales. Investigaciones previas indican que estos procesos ofrecen una alternativa para el tratamiento por las siguientes razones: las unidades de tratamiento requieren menos espacio, la concentración de biomasa en el efluente es al menos 10 veces menor y se asienta fácilmente en el clarificador secundario, la generación de lodos es menor que en los sistemas convencionales, no necesita recirculación de lodos para alcanzar una alta concentración de microorganismos y el consumo de energía relacionado con la DQO eliminada es bajo.

Evidentemente, el material portador es un componente muy importante, debido a que proporcionará la superficie necesaria para el desarrollo de la biopelícula que será el medio donde se producirá la remoción de la materia

orgánica. En consecuencia, esta investigación pretende buscar el mejor rendimiento de remoción de carga orgánica en un reactor aerobio de lecho móvil utilizando diferentes volúmenes de PVC corrugado como material portador cuando se alimenta con aguas residuales municipales. Se usará este material por ser resistente al estrés mecánico, estable durante varios años dentro de las aguas residuales y tener una gran superficie específica.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES

En el año 1999, se desarrolló una investigación que reportó una descripción general del proceso de biopelícula con lecho móvil y que además comparó y discutió los resultados de investigaciones y aplicaciones donde se empleó la tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas (remoción de carbono, nitrificación, remoción del nitrógeno y fósforo) (Odegaard, 1999). Presentó valores referenciales de diseño para la remoción de la DBO: para cargas de diseño de $8 \text{ kgDBO}_7/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y $25 \text{ gDBO}_7/\text{m}^2\cdot\text{d}$ (altas tasas) se alcanzó hasta un 75% a 80% de remoción, para cargas de diseño de $5 \text{ kgDBO}_7/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y $15 \text{ gDBO}_7/\text{m}^2\cdot\text{d}$ (tasas normales) se alcanzó hasta un 85% a 90% de remoción y para cargas de diseño de $2.5 \text{ kgDBO}_7/\text{m}^3\cdot\text{d}$ y $7.5 \text{ gDBO}_7/\text{m}^2\cdot\text{d}$ se alcanzó hasta un 90% a 95% de remoción, empleando el 67% del volumen del reactor ocupado por el material de soporte.

En el año 2000, se realizó una investigación para determinar la influencia del tamaño y forma de tres portadores en el proceso de biopelícula de lecho móvil para la remoción de carga orgánica, (Odegaard et al, 2000). Se evaluó la influencia de la forma y tamaño de tres portadores de HDPE ($0.95 \text{ g}/\text{cm}^3$) con superficies específicas efectivas de 500, 315 y $190 \text{ m}^2/\text{m}^3$ en la remoción de diferentes cargas orgánicas ($10\text{-}120 \text{ g DQO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) aplicadas a tres reactores pilotos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. En un primer período, los tres reactores trabajaron con los mismos volúmenes de llenado (60%) y cargas volumétricas entre 1 a $5 \text{ kgDQOs}/\text{m}^3\cdot\text{d}$, obteniéndose desempeños similares para la remoción de carga orgánica, sin embargo, al emplearse mismos volúmenes de llenado, el portador de $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ tuvo disponible mayor superficie específica y en consecuencia trabajo en cargas superficiales menores con respecto a los otros

portadores. En un segundo periodo se modificó los volúmenes de llenado en los reactores a 22%, 36% y 60% de portadores de 500, 315 y 190 m²/m³, para que todos los reactores tengan igual superficie para la biopelícula, obteniéndose desempeños similares para la remoción de carga orgánica. A partir de estos resultados, se concluyó que el factor clave en el diseño de un MBBR es la superficie específica efectiva del portador sobre la cual puede crecer la biomasa, y mientras la comparación se realice sobre esta base, los resultados obtenidos con portadores de diferentes formas y tamaños no variaran significativamente.

Según los estudios realizados por Odegaard et al. (1993, 1994); Rusten et al. (1998) y Andreottola et al. (2000), señalaron que un factor de importancia en los MBBRs fue el uso de un material como lecho móvil que permitió la retención de sólidos al interior del mismo a través de la biopelícula formada en su superficie y principalmente en los intersticios del lecho. Estas investigaciones se refirieron a la cantidad de lechos móviles agregados al MBBR como un porcentaje de su volumen, y recomendaron que la cantidad de medio soporte en el MBBR debe estar comprendida entre 40% y 70% de su volumen. Además, el lecho móvil debe ser lo suficientemente liviano, según Pastorelli et al. (1997), la densidad del material debe ser del orden de 1 g/cm³. Los desarrollos de Odegaard et al. (1994), siempre utilizaron medios soporte cilíndrico con una densidad de 0,95 g/cm³.

En el año 2008, se desarrolló una investigación para reconocer y caracterizar los parámetros de control y evaluación de un MBBR piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Minegatti, 2008). Los portadores utilizados fueron de polietileno, cilíndricos, ranurados externamente y con divisiones en su parte interna, de 25mm de diámetro y altura, densidad aproximada de 1g/cm³ y ocuparon un 20% de volumen de reactor. Las cargas de operación fueron de 1 KgDBO₅/m³d y 7.7 gDBO₅/m²d con un tiempo de contacto de 5.5 horas. Se obtuvieron eficiencias medias de remoción de 84% de DBO₅, 81% de DQO y 86% de SST. Los valores del IVL se obtuvieron entre 17 y 92 mL/g con un valor promedio obtenido fue de 47mL/g, siendo un lodo de buena sedimentabilidad. Se cuantificó la biomasa adherida a los portadores usando diferentes metodologías y recomendándose el uso de solución de NaOH al 1% para promover el

desprendimiento de los sólidos, y se determinó un valor promedio de Formación de Biomasa Adherida a los portadores (FBA) de 15.6 gSSV/m².

En el año 2010, se desarrolló una investigación que evaluó la eficiencia de remoción de carga orgánica en un MBBR para el tratamiento de aguas residuales domésticas, utilizando como portador de la biopelícula tubos de polietileno como una alternativa de bajo costo (Orantes & Gonzales, 2010). Los portadores fueron tubos corrugados de polietileno con diámetros de 1.1 cm y longitudes de 1.2 cm, con superficies específicas de 590 m²/m³ y ocuparon el 27% de volumen de reactor. La parte experimental se realizó en 237 días incluyendo 60 días de arranque y se evaluaron seis tasas de carga orgánica (2.3, 5.7, 10.2, 13.0, 17.8 y 35.7 gDQO/m².d con tiempos de contacto de 7.6, 5.7, 2.9, 1.9, 1.1, y 0.8 horas respectivamente) obteniendo remociones de DQO total entre 57% para la carga más alta y 79/81% para las cargas más bajas. Después de varios meses el material no mostro abrasión o deformación. La producción de lodos se comportó linealmente con la carga orgánica y la cantidad de microorganismos unidos al portador aumento con la carga orgánica tendiendo a un valor máximo asintótico de 17.3 g/m² (en forma de sólidos secos).

Respecto a las Cargas Orgánicas Volumétricas (COV) aplicadas a los MBBRs, se utilizaron diversos valores en las investigaciones que se indican resumidamente la tabla 2.1:

Tabla 2.1. COVs aplicadas a MBBRs en otras investigaciones

Referencia	COV
Wang et al., 2006.	1.17 a 1.29 kgDQO/m ³ .d
Luostarinen et al., 2006.	0.023 a 0.027 kgDQO/m ³ .d
Borghei & Hosseini, 2004.	0.044 a 0.0088 kgDQO/m ³ .d
Daude & Stephenson, 2003.	0.82 kgDQO/m ³ .d
Jahren et al., 1999.	<3.8 kgDQO soluble/m ³ .d
Helness & Odegaard, 2001.	0.3 a 1.2 kgDBO/m ³ .d
Sunner et al., 1999.	2.3 a 6.2 kgDBO/m ³ .d
Rusten et al., 1994b, 1998	2.7 a 70.0 kgDQO/m ³ .d
Broch-Due et al., 1997	2.7 a 26.9 kgDQO/m ³ .d

Odegaard et al., 1994 2 a 4 kgDQO/m³.d

Fuente: (Minegatti, 2008).

Al respecto, según Rusten et al (2000), los MBBRs tienen potencial para soportar COV de 1.0-1.4 kgDBO/m³.d, estos son valores superiores a las COV aplicadas al proceso de lodos activados por aireación prolongada, del orden de 0.1-0.4 kgDBO/m³.d y también superiores a las COV aplicadas al proceso de lodos activados convencional, del orden de 0.3-0.6 kgDBO/m³.d.

Respecto a las Cargas Orgánicas Superficiales (COS) aplicadas a los MBBRs, se utilizaron diversos valores en las investigaciones que se indican resumidamente la tabla 2.2:

Tabla 2.2. Cargas Orgánicas Superficiales aplicadas en otras investigaciones

Referencia	COS
Andreottola et al. (2003b)	9.3 gDQO/m ² .d
Daude & Stephenson (2003)	3.3 gDQO/m ² .d
Rusten et al. (1998)	8.1 a 48.6 gDBO/m ² .d
Rusten et al. (1997)	0.6 a 15.3 gDBO/m ² .d
Pastorelli et al. (1997)	3.5 gDQO/m ² .d
Hem et al. (1994)	1.0 a 5.0 gDBO/m ² .d
Odegaard et al. (1994)	<37.0 gDQO/m ² .d

Fuente: (Minegatti, 2008).

Según el experimento de Odegaard et al. (1994), se recomienda trabajar con COS de hasta 20 gDQO/m².d para obtener elevadas eficiencias de remoción de DQO (90-95%), y se pueden aceptar mayores cargas siempre que se use un método más eficiente que solo la decantación secundaria para separar la biomasa. Para COS de 37 gDQO/m².d el proceso presentó problemas de funcionamiento.

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.1 Identificación del problema

Para poder usar de forma eficiente nuevos lechos móviles en los MBBRs para el tratamiento de las aguas residuales, que representen una alternativa viable para la solución del problema, es necesario contar con información como la superficie específica efectiva (en m^2/m^3) y la Formación de Biomasa Adherida (FBA, en gSST/m^2 o gSSV/m^3) de los lechos, así como la cantidad de piezas (lechos) a llenar en los MBBRs (porcentaje de llenado); todas estas son propiedades que cambian según el lecho seleccionado y la composición del agua residual a tratar.

La determinación de estas propiedades permite caracterizar parámetros de control tales como la Carga Orgánica Superficial (COS) aplicada ($\text{KgDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ o $\text{KgDQO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$) y estimar la biomasa total en un MBBR, por tal motivo, se podría evaluar el desempeño de un MBBR con un lecho móvil nuevo en determinadas condiciones y poder utilizarlos de base para otras aplicaciones que tengan similares características, más acorde con las realidades locales.

2.1.2 Formulación del problema

Para poder utilizar de una forma eficiente la tecnología de MBBRs con nuevos y alternativos lechos móviles en nuestro país, se hace necesaria la realización de nuevas investigaciones en plantas pilotos y laboratorios que estén adaptados a las realidades locales, permitiendo de esta forma obtener información experimental que pueda ser la base sobre la cual se obtengan nuevos parámetros y criterios de diseño para los futuros proyectos.

2.1.3 Justificación de la investigación

Los MBBRs son una alternativa de tratamiento de aguas residuales que se ha investigado en algunos países europeos como Noruega, Alemania, Suecia, y también en Estados Unidos, México y Brasil. En nuestro país, de acuerdo a la información encontrada, se han desarrollado pocas investigaciones sobre sistemas de tratamientos aerobios de aguas residuales que empleen procesos de biopelícula que crece sobre un lecho móvil suspendido para la remoción de contaminantes orgánicos. En base a esto se desarrolló la investigación, a fin de poder estudiar las eficiencias de remoción de carga orgánica, sus ventajas, comportamiento, operación y principales problemas que pudieran presentarse en un sistema de este tipo, asimismo poder determinar de forma experimental los criterios de diseño en base a la realidad de nuestro país.

La investigación aportará beneficios en lo técnico, mediante la determinación de la influencia del PVC corrugado como material de soporte en el reactor aerobio, seleccionado por sus características como poseer una gran superficie específica interna y externa para el desarrollo de la biopelícula, por ser flexible y ligero lo que le permite utilizar todo el volumen del tanque, además de ser resistente al estrés mecánico causado por la turbulencia y ser un material estable durante varios años dentro de las aguas residuales; y también beneficios en lo económico al ser el PVC corrugado una opción accesible y de bajo costo en el mercado. La investigación dejara información referencial importante para que futuras aplicaciones puedan hacer un uso eficiente de la tecnología y del lecho móvil ahorrando así sus recursos disponibles.

2.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.2.1 Objetivo general

Evaluar, a escala de laboratorio, el desempeño de cuatro reactores aerobios de biopelícula de lecho móvil para la remoción de carga orgánica, cuando se utilizan diferentes porcentajes de llenado (5%,10%,20% y 40%) de lechos móviles como material de soporte para la biopelícula en los MBBRs.

2.2.2 Objetivos específicos

- Determinar y comparar, a partir de los diferentes porcentajes de llenado (5%,10%,20% y 40%) con PVC corrugado como lechos móviles en los MBBRs, el que logra el mejor porcentaje de remoción de carga orgánica presente en el agua residual.
- Determinar, evaluar y comparar la remoción de la DBO₅, DQO, NTK, nitritos y nitratos en cada sistema.
- Determinar, evaluar y comparar los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos fijos (SSF) en cada sistema.
- Determinar y comparar el crecimiento de la biopelícula adherida al lecho móvil en cada reactor al final de cada etapa.
- Determinar y comparar el crecimiento total de la biomasa en los reactores.
- Determinar y comparar la variación en los caudales afluentes a los reactores durante la investigación.
- Determinar y comparar el coeficiente global de transferencia de oxígeno (K_{La}) y la capacidad de oxigenación en los tanques de aireación.
- Determinar y comparar la variación en los caudales de aireación a los reactores durante la investigación.
- Determinar mediante el ensayo de trazadores el tipo de flujo que se presentan en los reactores.

- Determinar, evaluar y comparar la turbiedad, el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto (O.D.), como parámetros de control, en el afluente, reactor y efluente de cada sistema.
- Realizar observaciones en el microscopio, de los principales microorganismos presentes en los MBBRs.

2.3 HIPÓTESIS

Un reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil empleado para el tratamiento de aguas residuales domésticas puede lograr eficiencias de remoción de DBO_5 entre 85 a 95% cuando es operado bajo cargas orgánicas superficiales menores a $35 \text{ gDBO}_5/\text{m}^2.\text{d}$ y utilizando como lecho móvil para la biopelícula tubería de PVC corrugada de bajo costo.

2.4 VARIABLES DE ESTUDIO

2.4.1 Variables independientes

En referencia a los factores cuya modificación causa la alteración de las variables dependientes. Para la presente investigación las variables independientes corresponden a:

- Carga Orgánica aplicada.
- Dimensiones de los reactores aerobios y tanques de sedimentación secundarios.
- Cantidad del material de soporte utilizado (superficie total expuesta).
- Características del medio de soporte.
- Tasa de aireación.

2.4.2 Variables dependientes

En referencia a las características que se alteran por efecto de las variables independientes. Para la presente investigación las variables dependientes corresponden a:

- Concentración de la DBO_5 , DQO y turbiedad en el efluente.

- Concentración de SST, SSV, O.D. en el reactor y efluente.
- Concentración de sólidos adheridos al medio de soporte.
- Tipo de flujo en el reactor aerobio.

2.4.3 Variables intervinientes

En referencia a las características que alteran los resultados y están vinculadas con las variables independientes y dependientes. Para la presente investigación las variables intervinientes corresponden a:

- Temperatura y pH del agua residual.
- Condiciones ambientales locales. (Temperatura, presión atmosférica, etc.)

2.5 MARCO LEGAL

Los principales documentos legales vigentes y emitidos por el gobierno peruano que tienen relación con la investigación son:

- A. Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR doméstica o municipales: Decreto supremo N° 003-2010 MINAM.
- B. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua: Decreto supremo N°004-2017 MINAM -ECA Agua Sub Categoría 3.

CAPITULO 3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES

La base del tratamiento biológico de las aguas residuales es el uso de la actividad biológica o metabolismo de los microorganismos para lograr principalmente dos objetivos: la estabilización de la materia orgánica presente y la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables, aunque también son otros objetivos importantes la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y la eliminación de compuestos, a nivel traza, que pueden ser tóxicos (Metcalf & Eddy, 2003).

Los microorganismos para poder reproducirse y desarrollar sus funciones vitales necesitan de: (1) una fuente de carbono (como la materia orgánica o el dióxido de carbono) para la síntesis de material celular nuevo; (2) una fuente de energía (la luz o reacciones químicas de oxidación-reducción); y (3) elementos inorgánicos (nutrientes N, S, P, K, Mg, Ca, Fe, Na y Cl a nivel de trazas) y nutrientes orgánicos (aminoácidos, vitaminas, purinas y pirimidinas). Todas estas transformaciones en las células se dan por medio de reacciones bioquímicas de gran complejidad catalizadas por enzimas, y se denominan metabolismo microbiano (Metcalf & Eddy, 2003).

Los principales microorganismos que intervienen en el tratamiento biológico son los quimioheterótrofos, como las bacterias, los hongos, los protozoos y los rotíferos, cuya fuente de carbono son los compuestos orgánicos y su fuente de energía son las reacciones redox orgánicas. Según que compuesto sea el agente oxidante (aceptador de electrones) en estas reacciones, se pueden clasificar a los microorganismos quimioheterótrofos como aerobios (el aceptador de electrones es el oxígeno molecular), anóxicos (el aceptador de electrones es un compuesto inorgánico como el nitrito, nitrato o sulfato), y anaerobios (no incluye a un aceptor exterior de electrones, es intramolecular) (Romero, 2004).

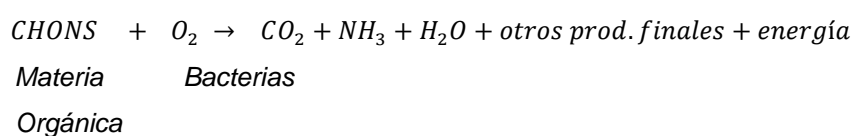
Esta clasificación de los microorganismos permite entonces clasificar los principales procesos de tratamiento biológicos en: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios, procesos combinados y los procesos de lagunaje. Así mismo, dentro de cada proceso existen subdivisiones dependiendo si el proceso de crecimiento microbiano se lleva a cabo en sistemas de cultivos de suspensión, en sistemas de cultivos adheridos o en sistemas combinados (Metcalf & Eddy, 2003).

3.1.1 Proceso aerobio

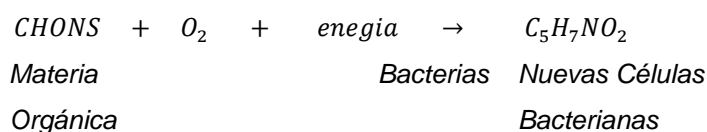
El proceso está constituido por las reacciones de oxidación biológica en las cuales el oxígeno molecular es el aceptador final de electrones (respiración aerobia); este es el proceso por el cual se transportan electrones (átomos de hidrógeno) del donante oxidable (compuesto orgánico carbonoso de alta energía potencial) al oxígeno molecular. La reacción es muy eficiente por que libera grandes cantidades de energía (proveniente de los enlaces químicos); esta energía es almacenada preferentemente en la biomasa sintetizada y los residuos de dicho catabolismo son compuestos estables de bajo contenido energético. Esta energía obtenida es utilizada por los microorganismos para reproducirse y funcionar de manera correcta. En ausencia o concentración mínima de materia orgánica, los microorganismos metabolizan su propio protoplasma y nutrientes de las células muertas, transformándolos en productos gaseosos y en energía para su mantenimiento (autólisis) (Romero, 2004).

De acuerdo con Romero (2004), las reacciones esenciales: catabolismo, anabolismo y autólisis ocurren simultáneamente y pueden ser resumidas como sigue:

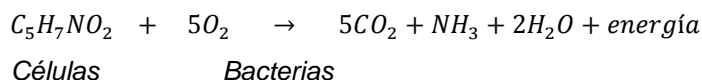
- Catabolismo (oxidación o descomposición)



- Anabolismo (síntesis o asimilación)



- Autólisis (respiración endógena o auto-oxidación)



3.1.2 Nitrificación y desnitrificación

La nitrificación es un proceso autótrofo donde los microorganismos utilizan el dióxido de carbono como fuente de carbono para la síntesis celular. Dos grupos de bacterias autótrofas son las principales en la nitrificación: Nitrosomonas y Nitrobacter. Las bacterias del grupo Nitrosomonas oxidan las moléculas de nitrógeno amoniacal (NH_4^+) a moléculas de nitrito (NO_2^-), las cuales serán transformadas a nitratos (NO_3^-) por la acción de bacterias del grupo Nitrobacter. Para estas transformaciones son requeridas aproximadamente 4,3 mg de O_2 por cada mg de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrógeno en forma de nitrato, consumiéndose en el proceso gran cantidad de alcalinidad: 8,64 mg de HCO_3^- , esta transformación no remueve el nitrógeno, pero si elimina su demanda de oxígeno. Para que ocurra la nitrificación, es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 1 mg/L; intervalos óptimos de pH entre 7,5 a 8,6 y elevadas temperaturas hacen el proceso más dinámico (Metcalf & Eddy, 2003).

Mientras que, el proceso de desnitrificación consiste inicialmente en la reconversión del nitrato, como el aceptor de los electrones, a nitrito; que a su vez, consecutivamente, se convierte a los gases óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno molecular, que pueden ser liberados para el ambiente, todo por la acción de bacterias heterótrofas anaerobias o facultativas en condiciones anóxicas,

debido a que la presencia de O.D. suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo del proceso, y con pH óptimo en el rango de 7-8 (Romero, 2004).

3.2 REACTORES Y SUS MODELOS

Los reactores son todos los envases, recipientes y/o depósitos en los que tienen lugar las reacciones químicas y biológicas. (Los principales tipos de reactores empleados en el tratamiento de las aguas residuales son: (1) reactor de flujo discontinuo o intermitente, (2) reactor de flujo pistón, (3) reactor de mezcla completa, (4) reactor de flujo no ideal, (5) reactor de lecho fijo y (6) reactor de lecho fluidizado o móvil (Metcalf & Eddy, 2003).

3.2.1 Reactor de flujo continuo y mezcla completa

En un reactor de este tipo las partículas del fluido que ingresan al reactor se dispersan instantánea y completamente en todo el volumen. Tiene una composición homogénea y uniforme en todo su volumen, cumpliéndose entonces que la composición del fluido a la salida es la misma que existe en el reactor. Es un modelo ideal, que se puede encontrar con bastante aproximación en los reactores aerobios donde la mezcla es propiciada por el mecanismo de aireación (Canepa, 2008).

3.2.2 Reactor de lecho fluidizado o móvil

Este tipo de reactores se llenan con algún tipo de medio tal como piedra, escoria, cerámica o plástico. Este medio se expande y se mezcla por el movimiento ascendente del fluido (aire y/o agua) a través del lecho (Romero, 2004).

3.3 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Desarrollado inicialmente en experimentos con un cultivo biológico en suspensión formado durante la aireación. Esta suspensión fue llamada

lodos activados, y correspondía a la biomasa activa responsable del proceso de depuración de aguas residuales (Arden & Lockett, 1914).

La figura 3.1 muestra la configuración básica del proceso de lodos activados, normalmente consta de un reactor donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano heterogéneo capaz de asimilar la materia orgánica presente en el agua residual a depurar. El proceso consta de un sistema de aireación y de agitación que suministre el oxígeno requerido por el proceso, que evite la sedimentación de los flóculos en el reactor y permita la homogenización de los lodos activados (Metcalf & Eddy, 2003).

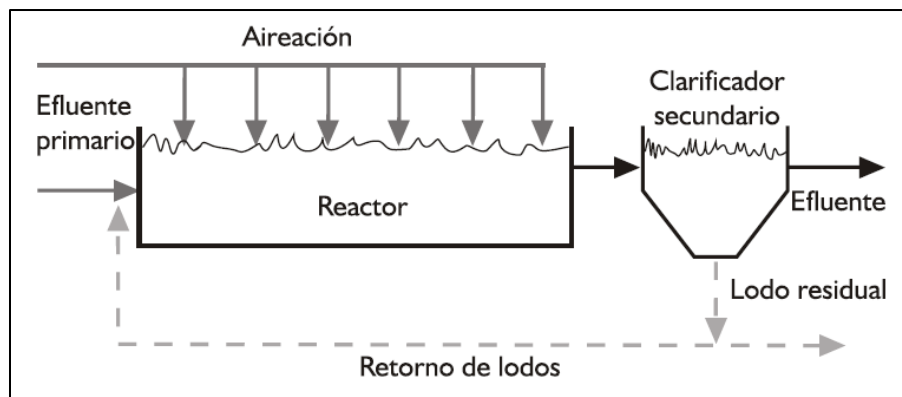


Figura 3.1. Esquema del proceso de lodos activados convencional.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).

Al cabo de un periodo de tiempo determinado, y una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, el líquido de mezcla se envía a un tanque de sedimentación (decantador secundario) donde se separa el lodo biológico del agua. Una parte de la biomasa decantada se recircula al reactor para mantener una concentración de microorganismos adecuada, mientras que el resto del lodo se separa del sistema para evitar una acumulación excesiva de biomasa y para retirar los microorganismos envejecidos. Estos solidos separados deberán ser concentrados y estabilizados para someterlos a una posterior disposición final. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los organismos más importantes porque son excelentes oxidadores de la materia orgánica del afluente y se desarrollan bien en aguas residuales, siendo capaces de

formar una capa floculenta gelatinosa de muy buenas características para la remoción de la materia orgánica (Calderón, 2005).

3.4 PROCESOS DE BIOPELÍCULA

Los procesos biológicos de biopelícula usados para el tratamiento de aguas residuales emplean un medio de soporte para el desarrollo de los microorganismos. En este tipo de procesos dicho medio entra en contacto con el agua residual propiciando que los microorganismos se adhieran a la superficie y se desarrollen formando una capa que constituyen una película biológica. Estos microorganismos se alimentan de la materia orgánica suspendida y disuelta en el agua residual (Palomino y Ballón, 2007).

3.4.1 Biopelícula

Las biopelículas son comunidades bacterianas englobadas en una matriz de exopolisacáridos (EPS) (macromoléculas de carbohidratos como Glucosa, Galactosa, Ramnosa, Glucosamina y que están generalmente enlazadas con proteínas) sintetizados por enzimas bacterianas y que se excretan y acumulan extracelularmente dando al cultivo un aspecto de forma gelatinosa, lo que permite la aglutinación de otros microorganismos y partículas coloidales (Von Sperling, 1996; Metcalf & Eddy, 2003). Las estructuras que forman estas microcolonias no son sólidas, porque contienen canales por los que circulan los nutrientes solubles, agua y oxígeno disuelto desde el medio externo hasta las capas internas y las capas juntas a la superficie del medio de soporte, donde el proceso de estabilización puede ocurrir hasta incluso en condiciones anóxicas (Lasa et al, 2005).

La biopelícula tiene como componente mayoritario el agua (hasta 97% del contenido total), son estructuras dinámicas y heterogéneas, su composición y características cambian con el tiempo y son variables en función del sistema en estudio, dentro de la biopelícula se pueden encontrar ambientes diferentes en los que

la concentración de nutrientes, pH y oxígeno es distinta (Lasa et al, 2005). La figura 3.2 presenta de forma esquemática el consumo de sustrato y la generación de subproductos derivados de las reacciones bioquímicas en procesos con formación de biopelícula.

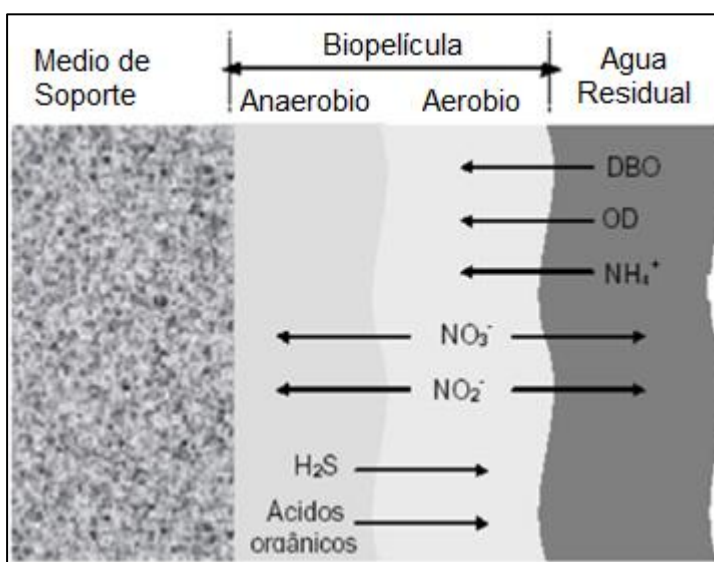


Figura 3.2. Representación esquemática de una sección de biopelícula.

Fuente: (Metcalf & Eddy, 2003).

3.4.2 Formación de la biopelícula

Existen varias teorías citadas para la formación de la biopelícula, según Marshal et al, 1983 (como se citó en Romero, 2015), sugiere para la formación de la biopelícula cinco etapas, que de forma esquemática fueron colocadas en el siguiente orden (ver figura 3.3):

- Acondicionamiento de la superficie por adsorción de materia orgánica. (1)
- Transporte de células y nutrientes al sitio de adherencia. (1)
- Inicio del proceso de adhesión bacteriana, todavía reversible, por atracción electrostática. (2)
- Crecimiento celular, colonización y adhesión irreversible. (3)
- La biopelícula presenta alta actividad metabólica y liberación de células localizadas en la periferia. (4-5)

Este último proceso es el que menos se conoce, en el caso del *Staphylococcus aureus*, estudios han descrito que se produce bacterias deficientes en la síntesis de exopolisacárido y por lo tanto deficientes en la formación de biopelícula. Esto permite a las bacterias mantener un pequeño porcentaje de la población incapaz de sintetizar el exopolisacárido y escapar de la biopelícula, otro caso es el del *Actinobacillus actinomicetecomitans* donde se ha descrito una actividad enzimática denominada dispersina que degrada de forma específica el exopolisacárido de la matriz de la biopelícula, esto sugiere que la degradación controlada de exopolisacárido puede representar un mecanismo controlado de liberación de bacterias del biopelícula (Lasa et al, 2005).

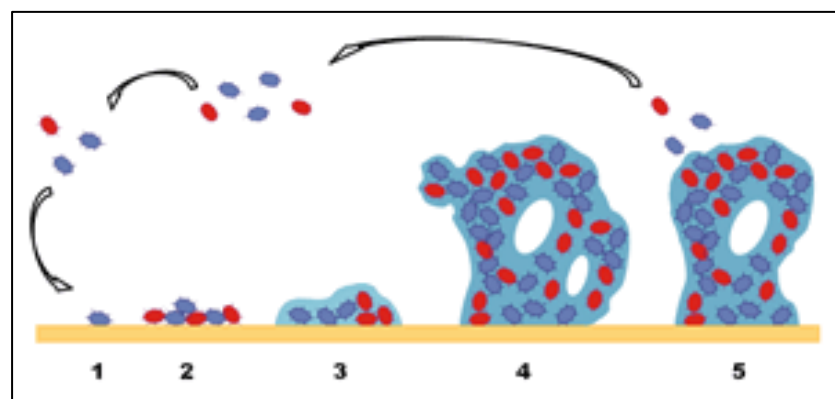


Figura 3.3. Esquema de las etapas de formación de la biopelícula.

Fuente: (Romero, 2015).

3.4.3 Comportamiento de la biopelícula en la depuración

En los reactores con biopelícula, los procesos metabólicos de conversión ocurren en el interior de la biopelícula. El transporte de los sustratos se realiza a través de procesos de difusión, inicialmente a través de la película líquida en la interfase líquido/biopelícula y en seguida a través de la propia biopelícula. Los productos de las reacciones redox son transportados en

sentido inverso, al exterior de la biopelícula. Tanto el sustrato donador y el receptor de electrones deben penetrar la biopelícula para que la reacción bioquímica se procese (Chernicharo et al., 2001). La figura 3.4 ilustra esquemáticamente lo indicado.

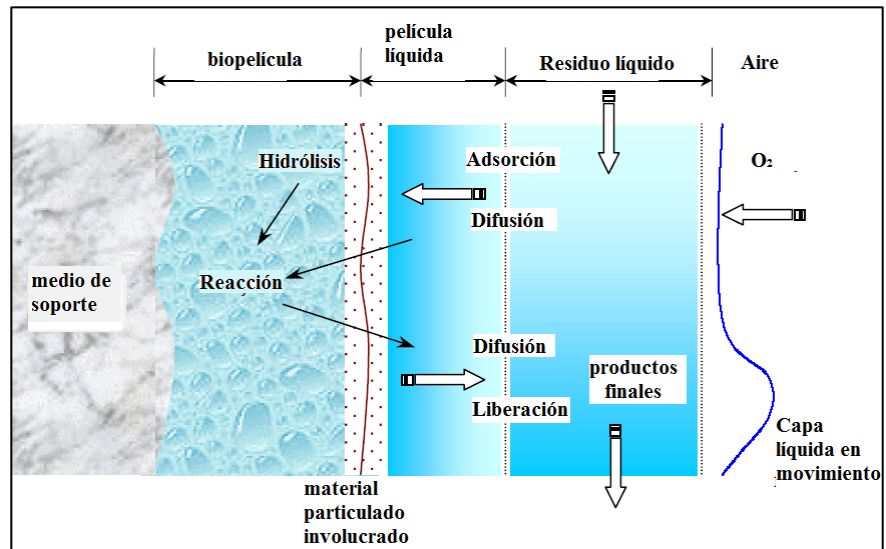


Figura 3.4. Mecanismos y procesos envueltos en el transporte y degradación de sustratos en la biopelícula.

Fuente: (Reynolds et al., 1995)

La difusión de compuestos dentro y fuera de la biopelícula desempeña un papel clave, debido a esto el grosor efectivo de la biopelícula (la profundidad de la biopelícula hasta a la que penetran los sustratos) se recomienda fina (menor a 100 μ m) y uniformemente distribuida sobre la superficie del soporte. Para lograr esto, para procesos de biopelícula con lecho móvil, la turbulencia en el reactor es importante, tanto para facilitar el transporte de los sustratos a la biopelícula como para mantener un bajo espesor de la biopelícula (Odegaard, 1999).

3.5 DESCRIPCIÓN DEL REACTOR DE BIOPELÍCULA DE LECHO MÓVIL (MBBR)

El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biopelícula sobre lechos móviles que se mueven libremente en todo el

volumen del reactor biológico. (Ver figura 3.5). En procesos aerobios, el movimiento de estos lechos es causado por la agitación establecida por el sistema de aireación, que proporciona la cantidad de aire necesaria para mantener los niveles de oxígeno disuelto adecuados y generar las condiciones de mezcla entre el agua y los lechos móviles, para asemejar el reactor a uno de mezcla completa; mientras que en los procesos anóxicos y anaeróbicos un mezclador o sistema mecánico mantiene los lechos en movimiento. (Odegaard, 1999). Los lechos móviles de la biopelícula son de material plástico, PVC o polietileno de alta densidad (HDPE de densidad 0.95-1 g/cm³) lo que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70% (Odegaard et al, 2000).

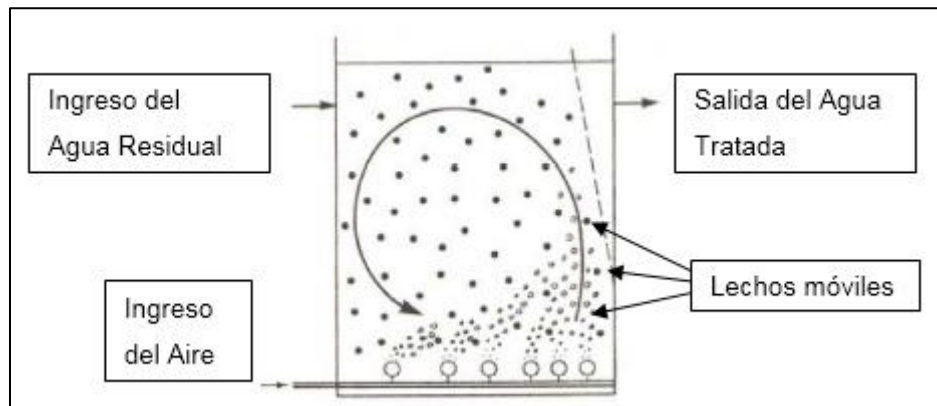


Figura 3.5. El reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil.

Fuente: (Odegaard et al, 1994)

El proceso se ha utilizado para muchas aplicaciones diferentes. Se ha investigado para la remoción de la materia orgánica, eliminación del nitrógeno y del fósforo, utilizando aguas residuales domésticas e industriales (Minegatti, 2008). En la figura 3.6 se presenta el diagrama para el tratamiento secundario: eliminación de la DBO/DQO.

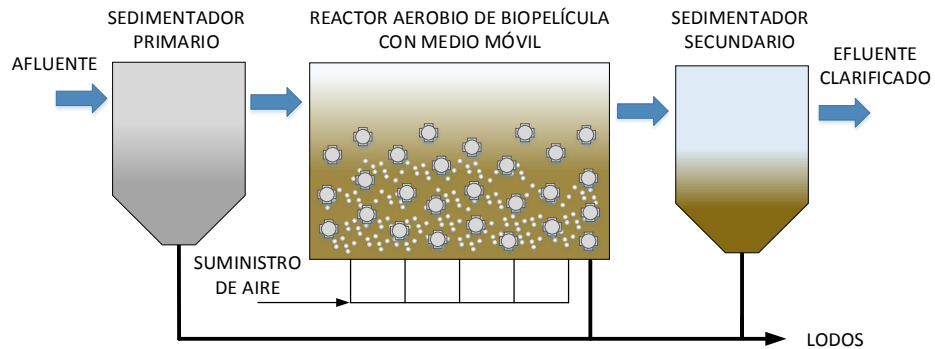


Figura 3.6. Diagrama típico del proceso de biopelícula con lecho móvil para remoción de carga orgánica.

Fuente: (Odegaard et al, 1994)

3.5.1 Composición de la biomasa en un MBBR.

La biomasa encargada de la depuración en un MBBR está conformada por los microorganismos en suspensión en el tanque, y los adheridos a los lechos móviles. La biomasa en suspensión está conformada por los flocs biológicos, estructuras heterogéneas de material orgánico, sedimentos y compuestos inorgánicos, material microbiano producido (células vivas) y de desecho (células muertas) (Von Sperling, 1996) y que representa un porcentaje de 2%-15% de la biomasa total (Rusten et al., 1994; Jahren et al., 2002); siendo entonces la biomasa adherida, que se encuentra conformando las biopelículas en los lechos móviles, la parte principal encargada de los procesos de depuración en los MBBRs. La concentración de la biomasa total en un MBBR puede estar entre 1400-1900 mgSSV/L, y representando el 85% la biomasa adherida (Jahren et al., 2002)

3.5.2 Ventajas frente a procesos biológicos convencionales

La idea básica para el desarrollo del MBBR era adoptar lo mejor del proceso de lodos activados y del reactor de biofiltro (Odegaard, 1999). Según Zalakain & Manterola (2011), de forma general, las

principales ventajas del proceso de biopelícula de lecho móvil frente a los procesos biológicos convencionales son:

- Reducción de volumen del reactor biológico por empleo de un medio de soporte como portador que proporciona una elevada superficie específica.
- Son procesos de gran flexibilidad, puesto que, en función del porcentaje de soporte empleado en el reactor, se consigue modificar la superficie y en consecuencia la eficiencia del proceso; y no exige recirculación de lodos al reactor. Se puede lograr una distribución uniforme de la carga aplicada sobre todo el volumen del tanque.
- Permiten la generación de una biomasa característica a cada tipo de reactor (aerobio, anóxico o anaerobio) dando lugar a la obtención de una biopelícula con una elevada actividad. Experimentalmente se ha investigado que las tasas de nitrificación y desnitrificación en este tipo de procesos son superiores a las obtenidas en los procesos convencionales.
- La biopelícula se forma estratificadamente de forma que, en presencia de inhibidores o picos de carga, sean las primeras capas las que sean afectadas. En consecuencia, habrá una baja en el rendimiento del reactor, pero una vez pasado el efecto del pico o inhibidor, la generación de la nueva biomasa y la recuperación de la actividad biológica se restablece relativamente rápido en comparación con los procesos convencionales.

3.5.3 Características del lecho móvil para la biopelícula

Las principales características de un lecho para permitir el desarrollo de la biopelícula se indican en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Requisitos que deben tener los lechos móviles para la biopelícula.

Característica	Objetivos
Ser estructuralmente resistente	Soportar el propio peso, adicionado al peso de los sólidos biológicos adheridos a su superficie
Ser química y biológicamente inerte	Evitar reacciones entre el lecho y los microorganismos
Tener una superficie específica elevada	Permitir la adherencia de microorganismos
Permitir la rápida proliferación de microorganismos	Disminuir el tiempo de arranque del reactor
Precio reducido	Viabilizar económicamente el proceso

Fuente: (Romero, 2015)

3.6 PRINCIPALES PARÁMETROS DE CONTROL DEL MBBR

Durante la operación de un MBBR, el control de los procesos biológicos de lodos activados y de biopelícula, en el mismo, son fundamentales para alcanzar y mantener elevados niveles de remoción de cargas contaminantes. Los principales parámetros que intervienen en el control son: (1) las cargas contaminantes; (2) la concentración de oxígeno disuelto en el reactor; (3) otros parámetros (Minegatti, 2008).

3.6.1 Cargas contaminantes

Para el diseño y control de los sistemas de tratamiento se consideran a las aguas residuales en función de sus características o composición, expresada en términos de concentración de ciertos parámetros, y también en función de su cantidad, expresada en términos de caudal. A la multiplicación de ambos, concentración y caudal, en un lugar y tiempo específico, se denomina carga y sus unidades son kg de parámetro/d o equivalentes (Romero, 2004).

3.6.1.1 Carga Orgánica del proceso (CO)

Expresada generalmente como la multiplicación de la concentración de DBO₅ ó DQO (S₀, en mg/L) por el caudal afluente (Q, en m³/d) (Romero, 2004). Es decir:

$$CO = S_0 \cdot Q \left(\frac{g \text{ DBO}_5}{d} \text{ ó } \frac{g \text{ DQO}}{d} \right)$$

3.6.1.2 Carga Orgánica Volumétrica (COV)

Es un parámetro muy usado en el diseño de un reactor de lodos activados. Está expresada generalmente como la división entre la carga orgánica aplicada al proceso y el volumen del tanque de aireación (V, en m³) (Romero, 2004). Es decir:

$$COV = \frac{S_0 \cdot Q}{V} \left(\frac{g \text{ DBO}_5}{m^3 d} \text{ ó } \frac{g \text{ DQO}}{m^3 d} \right)$$

3.6.1.3 Carga Orgánica Superficial (COS)

Es el parámetro de diseño y control del proceso MBBR que mejor se puede relacionar. Esta expresada como la división entre la carga orgánica aplicada al proceso y el área superficial total debida al medio de soporte (Área superficial total (A_{sup.total}), en m²) (Minegatti, 2008). Es decir:

$$COS = \frac{S_0 \cdot Q}{A_{sup.total}} \left(\frac{g \text{ DBO}_5}{m^2 d} \text{ ó } \frac{g \text{ DQO}}{m^2 d} \right)$$

3.6.2 Concentración de oxígeno disuelto en el reactor

El control de este parámetro permitirá mantener una cantidad de oxígeno disuelto adecuado para: (1) cubrir su demanda por parte de los microorganismos descomponedores de la materia orgánica, y (2) mantener su concentración dentro de los niveles operativos. (Izquierdo, 2006).

En el diseño del sistema de aireación de un MBBR, debe considerarse que la mayor cantidad de biomasa adherida y en suspensión, requiere de un mayor suministro de oxígeno disuelto. Así mismo, el sistema de aireación debe proveer la energía suficiente para mantener la mezcla de toda la masa del reactor, garantizando el transporte de los lechos por todo el volumen, y debe proveer los mecanismos de regulación, difusión y de transporte de la masa de oxígeno hacia la biopelícula. Odegaard et al. (1994) recomienda un intervalo de la concentración de OD entre 2 y 5 mg/L, mientras que Rusten et al. (1998) sugiere concentraciones de OD del orden de 3 mg/L para que se inicie el proceso de nitrificación.

3.6.3 Relación Alimento/Microorganismo (F/M)

Este parámetro comúnmente usado para el control del proceso de lodos activados, se puede aplicar para el control del MBBR siempre que se considere para el cálculo, además de la biomasa en suspensión, la biomasa adherida a los lechos móviles (Minegatti, 2008). Por lo tanto, la relación Alimento/microorganismos se redefine como:

$$\frac{F}{M} = \frac{S_0}{\theta X_{eq}} = \frac{S_0}{\theta(SSV_{ad} + SSV_{ML})} (d^{-1})$$

Dónde:

F/M = relación alimento/microorganismos, d^{-1}

S_0 = Concentración de DBO o DQO en el afluente, en kg/m^3 .

θ = Tiempo de retención hidráulica en el reactor, en d.

X_{eq} = Concentración total de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, en kg/m^3

SSV_{ad} = Concentración de sólidos suspendidos volátiles adheridos a los lechos móviles, kg/m^3

SSV_{ML} = Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla, en kg/m^3

Para lograr una gran eficiencia de remoción de carga orgánica, superiores a 90%, se recomienda operar el MBBR en valores de F/M dentro de 0,05 a 0,15 kgDBO₅/KgSSV_{eq.d}, similares a un reactor de aireación prolongada (Minegatti, 2008).

3.6.4 Otros parámetros de operación y control

La **temperatura** es un importante parámetro debido a: su influencia en la actividad bacterial y la velocidad de las reacciones que intervienen en el proceso; y sobre las operaciones y procesos de transferencia de oxígeno disuelto y la sedimentación. La temperatura óptima para la actividad bacterial está dentro del rango de 25°C a 35°C (Romero, 2004).

El **pH** es también otro importante parámetro, pHs bajos favorecen el crecimiento de microorganismos filamentosos de pobre sedimentabilidad. Se recomienda mantener el pH en el reactor aerobio entre 6,5 y 8,5 para tener un adecuado crecimiento microbiano (Romero, 2004).

En los MBBRs es usual utilizar la tasa “**Formación de Biomasa adherida**” (**FBA**) (Sólidos adheridos promedio/A_{sup}.Portador) para caracterizar la capacidad de adherencia y desarrollo de la biopelícula (como SS) en función del área superficial de los lechos móviles (Minegatti, 2008).

CAPITULO 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 UBICACIÓN

La parte experimental de la tesis se desarrolló en el módulo N°10 de la Zona de Investigación N°01 del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR-UNI), dependencia de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicado en la Av. Túpac Amaru S/N Rímac, Puerta N°07 UNI, al costado de Metro. (Ver Figura 4.1).



Figura 4.1. Ubicación de la Unidad de Investigación dentro de las instalaciones de CITRAR-UNI.

Fuente: (Google Earth, 2019)

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y CRITERIOS DE DISEÑO

La unidad de Investigación a escala de laboratorio contó con las unidades existentes del CITRAR-UNI: captación, pre-tratamiento (cámaras de rejas gruesas, rejas finas y desarenador) y bombeo (ver figura 4.2); y fueron implementados: un tanque de homogenización, un dispositivo regulador de caudal, dos reactores MBBR de funcionamiento en paralelo, un sistema de aireación, dos sedimentadores secundarios en paralelo (uno para cada reactor) y un sistema de disposición final. (Ver figura 4.3). En la figura 4.4 se presenta gráficamente lo indicado, y en el Anexo N°05 las fotografías.

Para la implementación de todas las unidades se consideró siempre trabajar con materiales inertes y/o resistentes a la acción corrosiva del agua residual como: el PVC, polietileno, bronce, aluminio, acero inoxidable, vidrio y siliconas sellantes resistentes al agua. Además, se usaron uniones universales en las conexiones y líneas entre las unidades para facilitar el desmontaje y la limpieza.

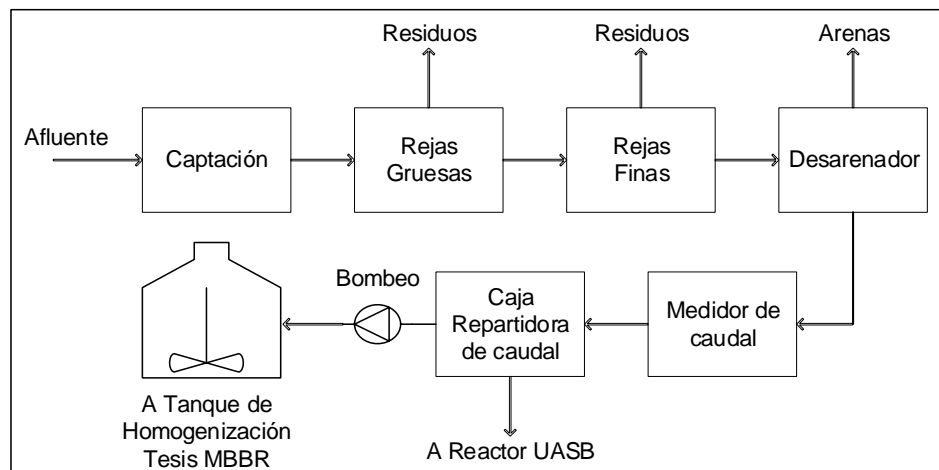


Figura 4.2. Diagrama de flujo de las unidades de pre-tratamiento del CITRAR-UNI.

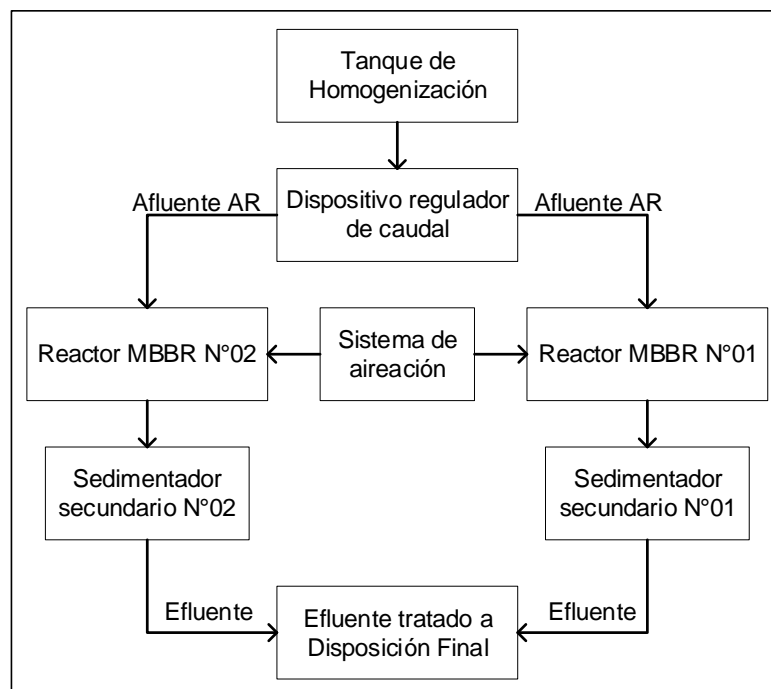


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la Unidad de Investigación Tesis MBBR.

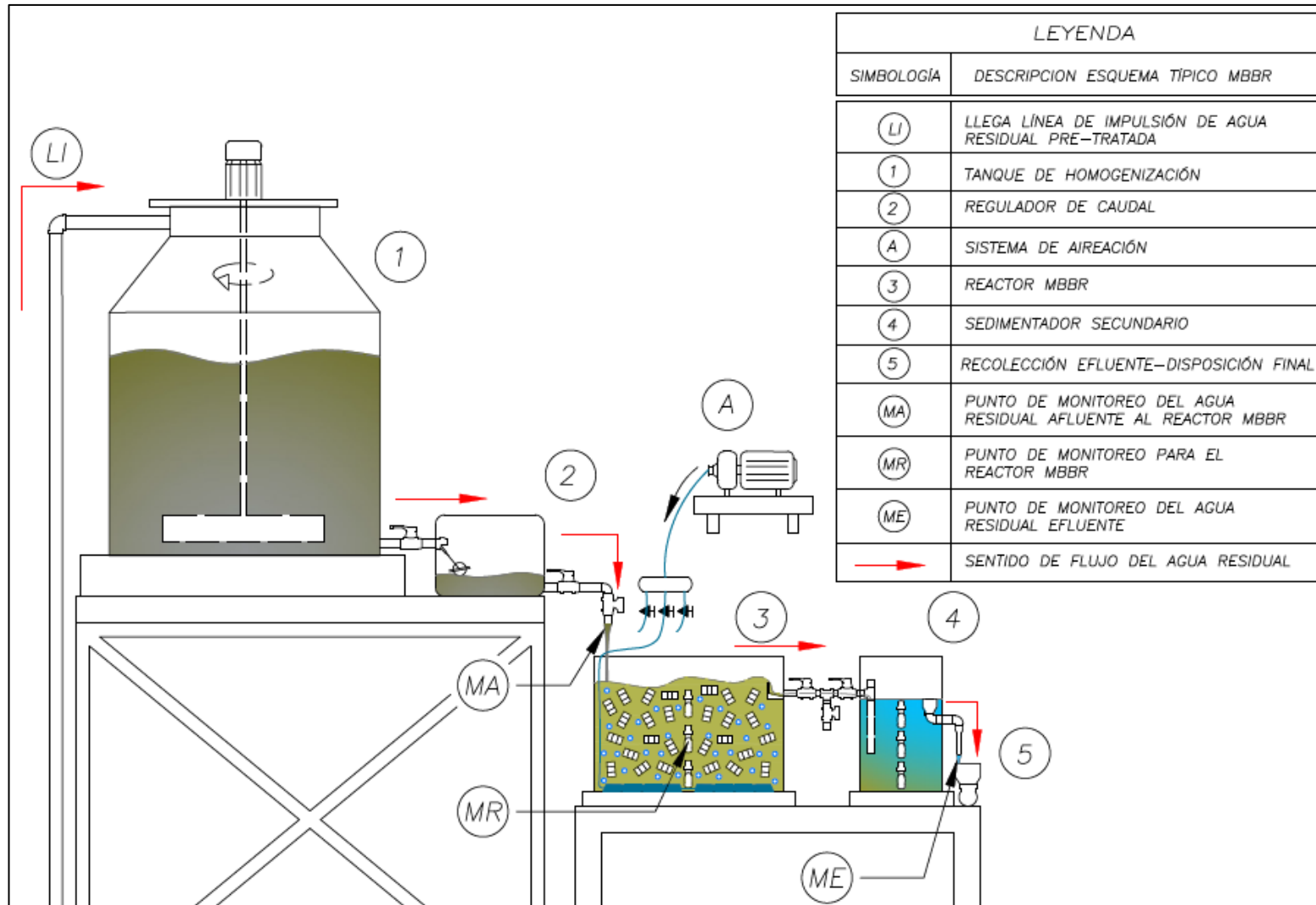


Figura 4.4. Esquema típico de los MBBRs implementados para la investigación.

4.2.1 Unidades de Captación, Pre-tratamiento y bombeo

El Afluente a la Unidad de Investigación fue agua residual del tipo doméstica proveniente de las unidades de pretratamiento del CITRAR-UNI conformadas por:

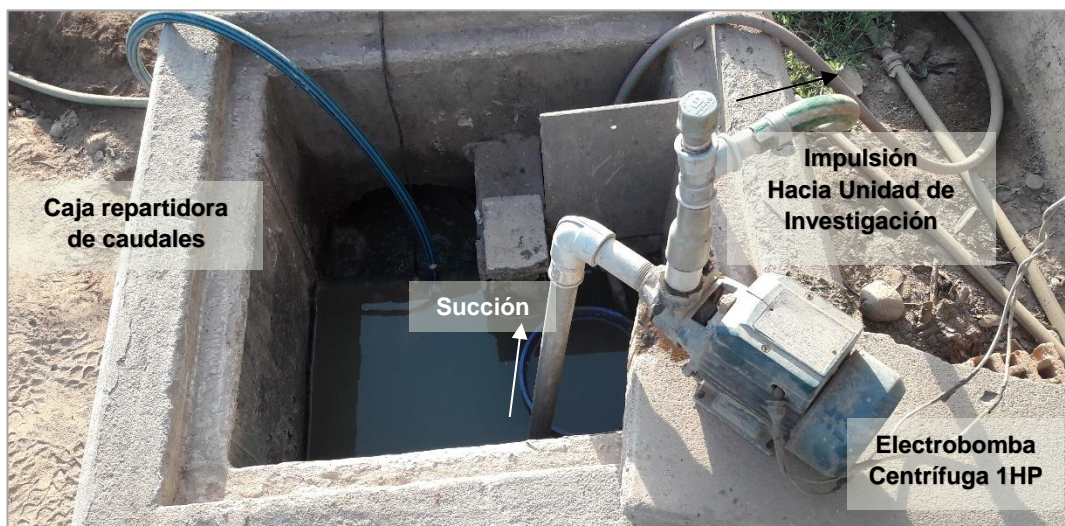
- **La captación**, donde se recolecto agua residual procedente de los A.A.H.H. El Ángel y El Milagro del distrito de Independencia.
- **La cámara de rejas gruesas**, conformada de 32 barras paralelas de fierro de 5 mm de espesor y dispuestas con una inclinación de 30° y una separación de 25 mm entre cada barra permitiendo retener sólidos gruesos existentes en el agua residual
- **La cámara de rejas finas** conformada de 19 barras paralelas de fierro de 5 mm de espesor y dispuestas con una inclinación de 56° y una separación de 15 mm entre cada barra complemento la retención de sólidos
- **El desarenador** de flujo horizontal y de sección rectangular que permitió remover las arenas y partículas en suspensión con diámetros mayores a 0,21 mm que son arrastradas por el agua residual, acumulándolas en una tolva de sección trapezoidal, en esta unidad la velocidad de paso es aproximadamente de 0,3 m/s y está controlada mediante un vertedero proporcional o sutro instalado a la salida.

Estas unidades fueron muy importantes para proteger los equipos de bombeo, válvulas y conducciones posteriores contra posibles obstrucciones debido a sólidos de gran tamaño. Su operación y mantenimiento fue realizada por los operarios del CITRAR-UNI. En la fotografía 4.1 se puede visualizar lo indicado.



Fotografía 4.1. Unidades de pre-tratamiento de CITRAR-UNI

Posterior a estas unidades de pretratamiento, el agua residual fue conducida a una caja repartidora de caudales, desde aquí se realizó la derivación hacia el tanque de homogenización con ayuda de una electrobomba centrífuga de 1 HP de potencia, una línea de succión de PVC de 3/4" de diámetro, y una línea de impulsión de manguera de 3/4" de diámetro. En la fotografía 4.2 se puede visualizar lo indicado.



Fotografía 4.2. Captación e impulsión del desagüe pretratado hacia la Unidad de Investigación

El prendido y apagado de este equipo fue de modo manual, y previo al llenado del tanque se realizó el cebado de la bomba y el purgado de la línea, los horarios de bombeo fueron variables y en general entre las horas de 11am a 3pm de lunes a sábado.

4.2.2 Tanque de homogenización

Esta fue la primera unidad implementada de la investigación. Estuvo conformada por un tanque de polietileno marca ETERNIT, de dimensiones 0.969m de diámetro, 1.1m de altura y 600L de capacidad; y sus accesorios: un tubo visor de agua, una válvula de PVC $\Phi 3/4$ " para la purga y otra válvula de PVC $\Phi 1/2$ " para la conexión hacia el dispositivo regulador de caudal. Se ubicó sobre una base metálica y una tarima a 1.65m de altura para garantizar que el sistema funcione por gravedad. Dentro del tanque se instaló una paleta de PVC de 0.10x0.50cm y cuyo eje estaba conectado a un motor reductor de 60 W de potencia y 8 RPM que le transmitía movimiento rotacional. El motor fue programado, mediante un interruptor horario análogo instalado en el tablero eléctrico, para funcionar de manera intermitente cada 15 minutos durante todo el día. La acción de la paleta logró mezclar el agua residual en el interior y reducir la formación de zonas de sedimentación.

El llenado del tanque se realizó diariamente y en diversos horarios (ver tabla 4.1), principalmente en horarios matutinos en la etapa N°01, 44% de los días entre las 11:00 a 13:00 horas el, y en horarios vespertinos en la etapa N°02, 53% de los días entre las 14:00 a 16:00 horas. En general, se trató de almacenar volúmenes de agua residual entre 500L a 600 L de agua para cubrir la demanda diaria de los reactores según los caudales de trabajo establecidos y garantizar así un flujo continuo. La limpieza del interior del tanque y su posterior purgado se realizó una vez a la semana, generalmente los días lunes.

Tabla 4.1. Horarios de llenado del tanque de homogenización durante la investigación

Horario de llenado (h)	Etapa N°01 09/05/18 - 04/10/18		Etapa N°02 24/10/18 - 01/03/19	
	datos	porcentaje	datos	porcentaje
9:00 a 10:00	1	1%	0	0%
10:00 a 11:00	7	8%	1	1%
11:00 a 12:00	18	20%	7	10%
12:00 a 13:00	22	24%	12	17%
13:00 a 14:00	13	14%	3	4%
14:00 a 15:00	13	14%	23	33%
15:00 a 16:00	10	11%	14	20%
16:00 a 17:00	5	6%	8	12%
Total	90	100%	69	100%

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Dispositivo regulador de caudal

Dispositivo conformado por una galonera de 40L de volumen, fue dispuesto de forma horizontal y conectado al tanque de homogenización mediante un tubo de abasto de $\Phi 1/2"$ x0.35cm. En su interior se instaló una válvula flotadora de bronce de $\Phi 1/2"$ y un flotador de plástico. Exteriormente a la galonera se instalaron dos válvulas de PVC de $\Phi 1/4"$ para alimentar de agua residual a cada reactor de forma independiente.

La acción de la válvula flotadora y el flotador permitió mantener un nivel de agua relativamente constante en el interior y disponer entonces de cargas hidráulicas constantes en las salidas de las válvulas, se logró así realizar calibraciones de caudales afluentes estables, o con mínimas variaciones durante el día, hacia los reactores.

La operación de esta unidad fue diaria. En horarios de la mañana se procedió a verificar las calibraciones del día anterior, previo al monitoreo, y en los horarios de la tarde se realizó una purga del dispositivo y una nueva calibración con ayuda de un cronómetro y un vaso de precipitado. El mantenimiento de esta unidad fue dos veces por semana, generalmente los martes y sábados, y consistió de un purgado y limpieza completa del dispositivo.

4.2.4 Reactor aerobio de biopelícula de lecho móvil (MBBR)

Estas unidades fueron el objeto principal de estudio en la tesis. Por tal motivo fueron implementadas en un tanque de vidrio de 6 mm de espesor, reforzado exteriormente con perfiles de aluminio 15x15mm en todas las aristas, con una placa central de vidrio de 4mm de espesor que dividió la estructura en dos cámaras paralelas de idénticas dimensiones, de 0.31x0.70m en la base y una altura de 0.5m, denominadas R1 y R2. El vidrio transparente permitió visualizar los procesos desarrollados en el interior de las unidades. El volumen útil de los reactores fue de 84L y el tiempo de retención hidráulico teórico fue 9.3 horas.

En las caras laterales exteriores de los MBBRs se instalaron 3 válvulas de bronce de $\Phi 1/4"$ a diferentes alturas para la toma de muestras y el mantenimiento. En la cara posterior, opuesta al afluente a los reactores, a 37cm de la base se instaló internamente un canal rectangular hecho de un ángulo de aluminio de 30x30mm y de 0.31m de longitud, donde por rebose se recolectó el efluente del reactor y se condujo hacia el sedimentador secundario. Adicionalmente se colocaron pantallas deflectoras, de PVC 0.10x0.31m, atrás de los canales para evitar el rebose de las natas y los lechos móviles hacia el canal.

El funcionamiento de estas unidades fue continuo, además los MBBRs trabajaron siempre bajo las mismas condiciones de carga,

con un caudal afluente constante regulado de 216 L/d; condiciones similares de aireación y las mismas condiciones ambientales. Diariamente, se operaron las válvulas para la recolección de las muestras y se realizó la limpieza del canal de recolección. La limpieza de esta unidad se realizó los días sábados consistiendo en la remoción de natas acumuladas en los bordes libres y en el lavado de las pantallas deflectoras.

Como medidas de protección se colocaron tapas sobre los reactores y sedimentadores para proteger a las personas alrededor de las posibles salpicaduras de agua residual generadas por la aireación, y para evitar la proliferación de vectores. Se cubrieron también todas las áreas laterales exteriores con plástico negro para evitar el paso de la luz solar y en consecuencia la proliferación de las algas fotosintéticas.

4.2.5 El Lecho móvil portador de la biopelícula

En el interior de los reactores se colocaron los lechos móviles estudiados, tuberías de PVC corrugado. Se seleccionó este material en base a los siguientes criterios:

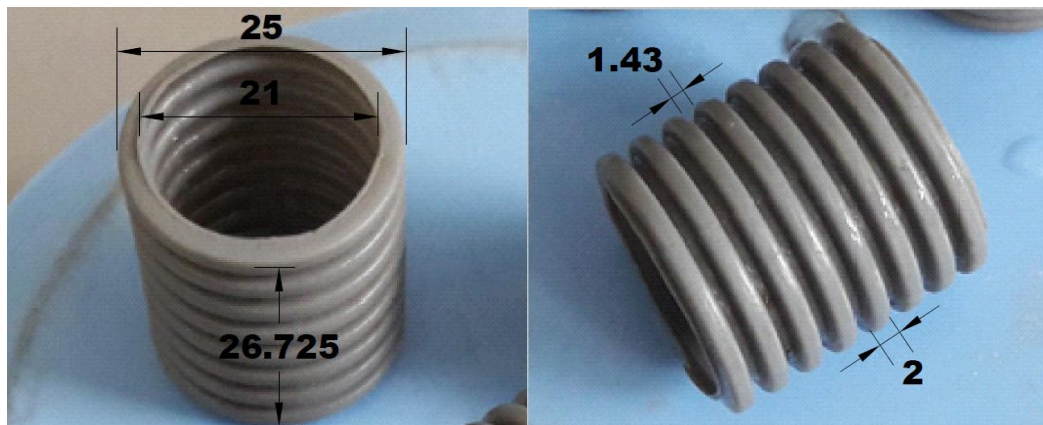
- Por su forma y material, tiene la capacidad para acumular la biopelícula.
- Gran superficie específica disponible para el desarrollo de la biopelícula, en un pequeño volumen tiene gran área superficial.
- Ligero. Capacidad para sumergirse y flotar en el agua residual.
- Estabilidad, es inerte y resistente al agua residual. Puede permanecer sumergido durante meses sin deteriorarse.
- De fácil acceso y manejo. Es Flexible puede curvarse y deformarse sin efectos adversos.
- Es un material local de bajo costo relativo comparado con otros lechos móviles disponibles en el mercado.

En las siguientes tablas 4.2 y 4.3 se describen las principales propiedades de este material, así como los detalles y dimensiones de los lechos móviles portadores de la biopelícula.

Tabla 4.2. Especificaciones del material utilizado para la fabricación de los lechos móviles portadores de la biopelícula en la investigación

Especificaciones	Detalle
Nombre comercial	Tubería corrugada flexible
Material	Policloruro de vinilo PVC Formula semidesarrollada: $(C_2H_3Cl)_n$ n=700 a 1500
Densidad	0.95 g/cm ³
Espesor	0.45 mm
Resistencia a la compresión	320 N
Temperaturas de trabajo	Desde -5°C hasta +60°C
Color	Gris

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 4.3. Detalles del lecho móvil portador de la biopelícula utilizado en la investigación (medidas en mm)

Tabla 4.3. Medidas estándar de los lechos móviles utilizados en la investigación

Medidas	Detalle
Diámetro exterior	25 mm
Diámetro interior	21 mm
Longitud	26.725 mm
Área superficial Total x pieza	7845.264 mm ²
Volumen efectivo x pieza	29379.62 mm ³
Superficie específica total (Área/Vol.)	267.112 m ² /m ³
Peso	1.2 g/pieza

Fuente: Elaboración propia

Los lechos móviles fueron dispuestos dentro de los reactores durante cada etapa en cantidades definidas, representando diferentes porcentajes de llenado respecto del volumen útil de los reactores MBBR las cuales se usaron para nombrarlos e identificarlos. En la tabla 4.4 se detalla lo señalado.

Tabla 4.4. Disposición de los lechos móviles dentro de los reactores durante la investigación

Etapa	Reactor: Nombre	Volumen del reactor (L)	% de llenado		Superficie total expuesta (m²)
			ocupado por los lechos móviles en los MBBRs	Cantidad de lechos móviles	
I	R1: R5%	84	5%	143	1.12
	R2: R10%	84	10%	286	2.22
II	R1: R20%	84	20%	572	4.49
	R2: R40%	84	40%	1144	8.97

Fuente: Elaboración propia

Es importante señalar que antes de colocar los lechos móviles en los MBBRs, estos fueron acondicionados, este procedimiento fue remojarlos en agua potable aireada durante aproximadamente una semana, con la finalidad de lograr que puedan sumergirse y

desplazarse dentro de la mezcla. Al terminar la primera etapa, los lechos móviles fueron retirados de los reactores y se realizaron las pruebas respectivas. Para el inicio de la segunda etapa, se colocaron nuevos lechos móviles, previamente acondicionados de similar forma.

4.2.6 Sistema de aireación

El sistema estaba conformado por la compresora de aire, la línea de impulsión, el *manifold* (dispositivo de tuberías y válvulas para distribuir fluidos) de distribución de aire, las líneas de distribución y los difusores. **La compresora de aire** utilizada tuvo las siguientes características (ver tabla 4.5):

Tabla 4.5. Especificaciones técnicas de la compresora de aire

Modelo	Potencia	Presión	Caudal Máximo	Ruido	Peso
ACO-009E HAILEA	112 W	>0.035Mpa	140L/min	<60dB	5.1kg
Dimensiones(mm): 283x147x173 - Φ Succión:1/2"- Impulsión:3/8" Voltaje: 220V – Frecuencia: 60Hz.					

Fuente: *Elaboración propia*

Esta compresora fue instalada dentro de una jaula metálica ubicada encima del nivel de los reactores, garantizando su correcta ventilación y evitando que el flujo de agua llegue hasta el equipo cuando este se apagara. En la base de la jaula se colocó dos planchas de material microporoso de 5mm de espesor con la finalidad de mitigar las vibraciones y proteger el equipo. Su funcionamiento fue permanente las 24 horas y solo se detuvo para mantenimiento y limpieza. Mensualmente se realizó la limpieza de su filtro de esponja.

La línea de impulsión de aire fue una manguera reforzada de Φ 3/8" y 1.2m de longitud, se conectó desde la salida de la

compresora hasta **el manifold de distribución**, accesorio de plástico con un ingreso principal de $\Phi 3/8"$ y 16 salidas de $\Phi 1/8"$, en 12 de estas salidas se instalaron válvulas de aire plásticas $\Phi 1/8"$ para controlar y regular el flujo de aire suministrado a los reactores. **Las líneas de distribución de aire** fueron 12 mangueras de silicona de $\Phi 1/8"$ y 1-1.4m de longitud, instaladas desde el manifold hasta los difusores.

Los 12 difusores empleados en la investigación fueron del tipo piedra cerámica porosa y de burbuja fina, de longitud 30.5cm y sección trapezoidal de 20x22mm, marca MARINA. Se instalaron 06 unidades en el fondo de cada reactor de forma proporcional al área para evitar las zonas muertas. Cada dos meses se realizó la verificación y recalibración de los caudales de aire hacia los reactores.

4.2.7 Sedimentador secundario y disposición final

Para complementar los procesos de transformación de la materia orgánica en los MBBRs, se instalaron dos sedimentadores secundarios en paralelo. Aquí se generaron las condiciones de reposo necesarias para que por efecto de la gravedad los lodos remanentes del agua residual proveniente de los reactores puedan sedimentar y acumularse en el fondo, permitiendo tener un efluente clarificado en la parte superior.

Estas unidades fueron implementadas de forma similar a los reactores, las dimensiones de cada cámara fueron de 0.31x0.30m en la base y una altura de 0.45m, su volumen útil fue de 32.5L considerando una zona de sedimentación y una zona de espesamiento de lodos, siendo el tiempo de retención hidráulico teórico fue de 1.8 horas.

En las caras laterales exteriores también se instalaron 3 válvulas de bronce de $\Phi 1/4$ " a diferentes alturas para la toma de muestras y el mantenimiento. Dentro de los sedimentadores se colocó: en el ingreso, una tubería vertical de PVC $\Phi 1/2$ " de 0.15m de longitud, que dirigió el agua residual proveniente de los reactores hasta 0.08m sobre el fondo promoviendo un flujo ascendente; y en la salida, a 0.35m del fondo, un embudo de $\Phi 3$ " adaptado a un codo de PVC $\Phi 1/2$ "x90° que recolectó el efluente clarificado y lo condujo al exterior. En el fondo se instaló una rampa con pendiente de 10% hacia la válvula de purga para facilitar la extracción del lodo acumulado. Para la disposición final se instalaron dos embudos $\Phi 4$ " recolectores de los efluentes y un colector de PVC $\Phi 3/4$ " conectado a la red de desagüe del CITRAR-UNI.

El funcionamiento de la unidad fue permanente (salvo en las etapas de mantenimiento). Diariamente se tomaron muestras del efluente para sus análisis en laboratorio. Las actividades de mantenimiento fueron semanales, generalmente los días sábados, y consistieron en el purgado de los lodos acumulados; el vaciado y la limpieza del tanque, los accesorios de ingreso y de salida.

4.3 CRONOGRAMA DE TRABAJO DESARROLLADO

La parte experimental de la investigación se desarrolló en tres etapas con una duración total de 56 semanas. La etapa de acondicionamiento comprendió las actividades de implementación del sistema y las pruebas iniciales con agua potable; en la etapa N°01 se realizó el estudio de los MBBRs utilizando los porcentajes de llenados de 5% y 10% de su capacidad ocupada con los lechos móviles; y en la en la etapa N°02 se realizó el estudio de los MBBRs con porcentajes de llenados incrementados a 20% y 40% de su capacidad ocupados con los lechos móviles, siendo esto la principal diferencia entre ambas etapas. (Ver tabla 4.6).

Tabla 4.6. Detalles del Cronograma desarrollado en la investigación

Detalles	Etapas		
	Acondicionamiento	Etapa N°01	Etapa N°02
Inicio	05-02-2018	07-05-2018	24-10-2018
Final	04-05-2018	19-10-2018	01-03-2019
Duración	13 semanas	24 semanas	19 semanas
Muestra	Agua potable	Agua residual	Agua residual
Caudal (L/d)	216	216	216
% de llenado			
de los			
MBBRs con	Reactor N°01: 5%	Reactor N°01: 5%	Reactor N°01:20%
lechos	Reactor N°02:10%	Reactor N°02:10%	Reactor N°02:40%
móviles			
Pruebas	Iniciales,	De calibración,	De calibración,
realizadas	De calibración	De laboratorio,	De laboratorio,
		Sólidos Adheridos	Sólidos Adheridos
		Observaciones en	Observaciones en
		el microscopio	el microscopio

Fuente: Elaboración propia

4.4 PRUEBAS REALIZADAS

4.4.1 Pruebas iniciales

Fueron pruebas realizadas en la etapa de acondicionamiento del sistema para probarlo, realizar las correcciones necesarias y las calibraciones previas al arranque. Ver tabla 4.7.

Tabla 4.7. Pruebas iniciales realizadas en la investigación

Prueba	Referencia del método	Descripción del método	Aplicación
Prueba de estanqueidad	(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], 2005).	Todas las unidades implementadas fueron sometidas a esta prueba para constatar su impermeabilidad. Fueron llenadas con agua hasta sus niveles máximos durante 24 horas. La prueba fue exitosa cuando no se presentaron filtraciones, en caso contrario se descargó la unidad, y después de haberse efectuado el resane, se repitió la prueba hasta conseguir la impermeabilidad.	Aplicación a todas las unidades
Evaluación del Coeficiente de transferencia de Oxígeno	(Romero, 2004).	La medición de este parámetro permitió verificar la distribución de aire a los reactores. Valores similares de $K_L a$ garantizarían ingresos de aire también proporcionales.	Aplicada a los reactores
Ensayo de trazadores	(Perez, 1992).	Este ensayo se realizó para evaluar las condiciones hidráulicas del reactor como el tipo de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos. Consistió en agregar una concentración controlada del trazador cloruro de sodio en el afluente durante un tiempo igual a 1/30 del tiempo de retención teórico; y simultáneamente medir en el efluente la variación de la concentración en el tiempo, a través del parámetro de conductividad, hasta que retorne a sus valores iniciales. Se realizó el análisis utilizando el método de la curva de tendencia.	Aplicada a los reactores

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.2 Pruebas de calibración

Determinación del caudal de aireación: mediante esta prueba se buscó controlar y regular el caudal de aire. Se estableció un caudal total 15 L/min para cada reactor o 2.5 L/min por línea, en base a los requerimientos de oxígeno de la biomasa en suspensión y la biomasa adherida estimados, y también para garantizar una distribución uniforme, mantener los niveles de O.D. y las condiciones de mezcla en los reactores. Detalles:

- Materiales: Medidor de flujo Visi-Float serie VFB4” Rango No.65 0.2-4 LPM Marca Dwyer Instruments. 02 conectores machos NPT 1/8” y 30cm de manguera siliconada de Φ 1/8”.
- Aplicación: Al manifold y líneas de distribución de aire.
- Frecuencia: cada dos meses.
- Procedimiento: Se instaló el medidor de flujo en las líneas de distribución conectando una manguera auxiliar, por un extremo a una salida del manifold y por el otro al ingreso del equipo, mientras que la línea de distribución se reconecta a la salida del mismo, quedando el instrumento en la línea de flujo y posición vertical. Se reguló la válvula de dicha línea a un caudal constante. Se repitió este procedimiento para las doce líneas, hasta que se estabilizaron los valores. Tomado de Palomino y Ballón (2007); Dwyer Instruments, Inc. (2019).

Determinación del caudal de ingreso de agua residual: mediante esta prueba se buscó controlar y regular el caudal afluente a los reactores. Detalles:

- Materiales: un vaso de precipitado calibrado de 250mL y un cronómetro.
- Frecuencia: diaria. Se verifico la calibración en horarios de la mañana, previo al muestreo; y en la tarde se realizó una nueva calibración.

- Procedimiento: posterior al purgado del dispositivo regulador de caudal, se regularon las válvulas de control de los afluentes y se aforó el caudal en el vaso de precipitado durante un minuto. Se repitió este procedimiento, hasta que se estabilizaron los valores en el caudal de calibración de 150 mL/min (equivalente al caudal de la investigación de 216 L/d) para cada reactor.

4.4.2.1 Puntos de muestreo y pruebas de laboratorio realizadas

En la tabla 4.8 se indica la ubicación y abreviaturas usadas de los puntos de muestreo (en cada etapa) para la realización de las pruebas. En la tabla 4.9 se presentan las pruebas que fueron desarrolladas en los laboratorios del CITRAR-UNI y de la FIA-UNI.

Tabla 4.8. Puntos de muestreo y sus abreviaturas en cada etapa de la investigación

Etapa	Ubicación del punto de muestreo	Abreviatura
	Afluente común (ingreso a los MBBRs)	Afluente N°01
Etapa N°01	MBBR con % de llenado de lechos móviles del 5%	R5%
	MBBR con % de llenado de lechos móviles del 10%	R10%
	Efluente del sistema MBBR R5% y su decantador secundario	E5%
	Efluente del sistema MBBR R10% y su decantador secundario	E10%
	Afluente común (ingreso a los MBBRs)	Afluente N°02
Etapa N°02	MBBR con % de llenado de lechos móviles del 20%	R20%
	MBBR con % de llenado de lechos móviles del 40%	R40%
	Efluente del sistema MBBR R20% y su decantador secundario	E20%
	Efluente del sistema MBBR R40% y su decantador secundario	E40%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Pruebas de laboratorio realizadas en la investigación

Prueba	Método	Descripción	Punto de muestreo	Frecuencia
pH	*SMEWW Parte 4500-H+ B.	Método Electrométrico	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Diaria
Temperatura (°C)	SMEWW Parte 2550 B	Termómetro en laboratorio	Ambiente – Afluyente - MBBRs – Efluentes	Diaria
Turbiedad (U.N.T.)	SMEWW Parte 2130 B	Método Nefelométrico	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Diaria
O.D. (mg/L)	SMEWW Parte 2550 G	Método de electrodo de membrana	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Diaria
DBO ₅ (mg/L)	SMEWW Parte 5210 B	Prueba al 5to. Día -DBO	Afluyente – Efluentes	Semanal
DQO (mg/L)	SMEWW Parte 5220 D	Método colorimétrico	Afluyente – Efluentes	Semanal
I.V.L.	SMEWW Parte 2710 D	Índice volumétrico lodo	MBBRs	Semanal
SST (mg/L)	SMEWW Parte 2540 D	Secados a 103-105°C	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Semanal
SSV (mg/L)	SMEWW Parte 2540 E	Incinerados a 550°C	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Semanal
SSF (mg/L)	SMEWW Parte 2540 E	Incinerados a 550°C	Afluyente – MBBRs - Efluentes	Semanal
Nitrógeno Total (mg/L)	SMEWW Parte 4500-N _{org} B	Método macro-Kjeldahl	Afluyente – Efluentes	Final de etapa
Nitritos (mg/L)	SMEWW Parte 4500-NO ₂ ⁻ B	Método colorimétrico	Afluyente – Efluentes	Final de etapa
Nitratos (mg/L)	SMEWW Parte 4500-NO ₃ ⁻	Método colorimétrico	Afluyente – Efluentes	Final de etapa

*SMEWW = Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd Ed. 2017. APHA-AWWA-WEF.

Fuente: Elaboración Propia.

4.4.3 Observaciones en el microscopio

Se realizaron las observaciones en el microscopio como complemento del control operativo del sistema. Se buscó reconocer a los grupos principales de microorganismos como los rotíferos, ciliados adheridos, ciliados natatorios libres, flagelados y gusanos nematodos, que pudieran indicar condiciones de crecimiento favorables para obtener un buen asentamiento del lodo y un efluente de buena calidad. Detalles:

- Equipos y materiales: Microscopio modelo Primo Star, marca Carl Zeiss objetivo (4x, 10x, 40x, 100x). Portaobjetos y cubreobjetos, aceite para microscopio, goteros y alcohol isopropílico.
- Aplicación: análisis de muestras de los MBBRs, incluyendo la materia en suspensión y la biopelícula adherida a los lechos móviles, y sedimentadores.
- Frecuencia: la prueba se realizó al término de las etapas N°01 y N°02.
- Procedimiento: luego de realizado el muestreo, con ayuda de un gotero se retiraron unas gotas de la muestra y se colocaron sobre el portaobjeto, suavemente se esparcieron para que puedan ser cubiertas plenamente con el cubre objeto, evitándose las burbujas. Preparada la lámina, se instaló en el microscopio y se realizó la búsqueda usando las vistas de 10x y 40x principalmente. Se registró con ayuda de una cámara fotográfica. (León y Ochoa, 2016).

4.4.4 Determinación de la biomasa adherida en los lechos móviles

Esta prueba permitió estimar la cantidad de biomasa presente en la biopelícula adherida en los lechos móviles, a través de la determinación de SST y SSV; complementando así las pruebas realizadas a la biomasa en suspensión, permitiendo estimar la biomasa total del reactor MBBR.

Según Cammarota (1998) (como se citó en Minegatti, 2008), la metodología usualmente aplicada para la determinación de la biomasa adherida en los lechos móvil de los MBBRs usa como principio la presencia de Hidróxido de sodio (NaOH) disuelto a bajas concentraciones, para promover la lisis de las bacterias y favorecer el desprendimiento de la biopelícula del medio de soporte. En la investigación se empleó el siguiente protocolo tomado de Minegatti (2008):

- Aleatoriamente se tomaron 16 muestras de lechos móviles en cada reactor en la etapa N°01 y 17 muestras de lechos móviles en cada reactor en la etapa N°02. Para hacer la toma de muestras más representativa, se sectorizo a los MBBRs en tres zonas: ingreso, intermedio y salida, recogiendo similares cantidades de lechos móviles en cada sector.
- Se preparó una solución de 1% de hidróxido de sodio (NaOH) disuelto en agua destilada y se repartió a recipientes de 200mL donde se sumergieron los portadores.
- Con ayuda de una bagueta se agitó suavemente los portadores para promover el desprendimiento de la biopelícula. El tiempo de contacto fue de 20 minutos o hasta que el desprendimiento este completado.
- Posteriormente, se retiraron los portadores de los recipientes y con la mezcla de agua y sólidos resultante se procedió a realizar las pruebas de SST y SSV según el método SMEWW Parte 2540 D y E.
- La frecuencia de aplicación de este procedimiento fue al final de cada etapa y se realizó para todos los reactores.

CAPITULO 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 MEDICIONES DEL CAUDAL AFLUENTE A LOS MBBRs

En la tabla 5.1 se presentan los caudales promedios afluentes: durante la primera etapa fueron de 205.60 L/d para el reactor R5% y 204.61 L/d para el reactor R10%, representando una variación de 4.81% y 5.27% respecto al caudal de diseño de 216 L/d; y durante la segunda etapa fueron de 210.30 L/d y 208.38 L/d para los reactores R20% y R40%, representando una variación de 2.64% y 3.53% respecto al caudal de diseño.

En la tabla 5.1 también se observa que se calibraron caudales mínimos de 108 L/d durante la primera etapa y 144 L/d durante la segunda etapa. En general esto sucedió los fines de semana, es decir los días viernes o sábados, y en algunos días feriados, siendo la finalidad abastecer de agua residual a los reactores MBBRs hasta el día de reinicio de actividades (ver anexo N°01). Los caudales máximos calibrados fueron de 230.4-237.6 L/d durante la primera etapa y de 252 L/d durante la segunda etapa, siendo todos casos excepcionales que ocurrieron por interferencias y dificultades en la calibración (ver anexo N°01).

Tabla 5.1. Resumen de las mediciones de caudal afluente a los MBBRs

Etapa	Afluente al MBBR:	Caudal (L/d)			Datos
		Promedio	Máximo	Mínimo	
N°01 (24 semanas)	R5%	205.60 ± 22.05	230.4	108	153
	R10%	204.61 ± 24.85	237.6	108	153
N°02 (19 semanas)	R20%	210.30 ± 16.21	252	144	120
	R40%	208.38 ± 17.27	252	144	120

Fuente: Elaboración propia

Se observa el ligero aumento de los caudales promedios en la segunda etapa (R20% y R40%) respecto a la primera (R5% y R10%), siendo el

caudal afluente al reactor R20% el que más se acercó al caudal de diseño y además de ser el de menor desviación estándar ($\sigma=16.21$). Se aprecia también que las desviaciones estándar fueron mayores durante la primera etapa ($\sigma=22.05$ y $\sigma=24.85$), lo que indica una mayor dispersión en los datos y menor precisión en la calibración.

Los valores de los caudales no lograron ser siempre constantes a lo largo de un día de operación, a pesar de la precisión en la calibración el día anterior, al realizarse la verificación al día siguiente, a veces, se presentaron pequeñas variaciones negativas en el caudal del orden de 10-25 L/d (Ver gráfico 5.1). Esto como resultado de la acumulación de sedimentos en las válvulas reguladoras de caudal y de la influencia del nivel de agua en el tanque de homogenización sobre el nivel de agua en el dispositivo regulador de caudal. Para lograr compensar esta mínima variación se reguló los caudales a 223.2 L/d.

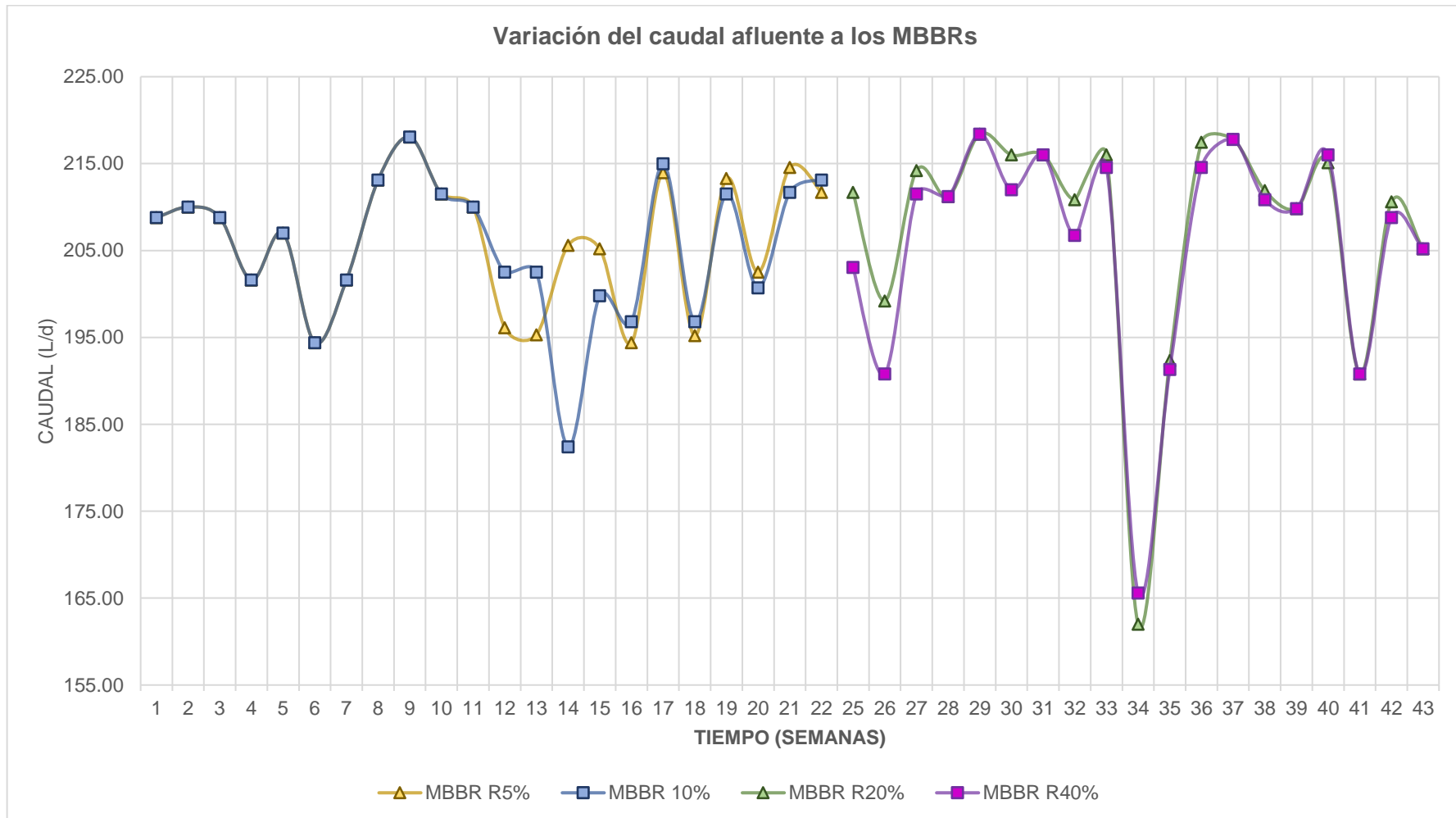


Gráfico 5.1. Variación del caudal afluente a los MBBRs durante la investigación

5.2 DETERMINACIÓN DEL K_{La} Y CAPACIDAD DE OXIGENACIÓN

En el Gráfico 5.2, se representó los resultados de las pruebas realizadas y se determinó el coeficiente global de transferencia de oxígeno (K_{La}) como la pendiente de la recta que forman los puntos, determinada por el método de mínimos cuadrados.



Gráfico 5.2. Determinación del coeficiente global de transferencia de oxígeno (K_{La}) en los reactores.

En la tabla 5.2, se detallaron los resultados de las pruebas. El valor del K_{La} fue de 0.0072 s^{-1} para el reactor N°01 a 26.1°C y de 0.0068 s^{-1} para el reactor N°02 a 23.3°C . Teniendo en consideración el efecto de la temperatura, se corrigieron los valores usando la expresión siguiente:

$$K_{La(T)} = K_{La(20)} \times 1.020^{T-20}$$

La que permitió determinar el valor de K_{La} de 0.0064 s^{-1} a 20°C , para ambos reactores. Este resultado indica una distribución uniforme de caudal de aire en ambos reactores. Adicionalmente se determinó la capacidad de oxigenación, definida como la velocidad en la transferencia de oxígeno (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Detalles de las pruebas y determinación de la capacidad de oxigenación de la compresora en los reactores

Detalles	Reactor N°01	Reactor N°02
Fecha de prueba	23/04/2018	07/05/2018
Horario	16:15 – 16:45	14:55 – 15:55
Temperatura (°C)	26.1	23.3
Concentración	8.26	8.67
Saturación (mg/L)		
$K_{La}(T^{\circ})$ en (s^{-1})	0.0072	0.0068
K_{La} (20°C) en (s^{-1})	0.0064	0.0064
Volumen reactor (L)	84	84
Capacidad de oxigenación (gO_2/h)	17.98	17.83
$C.O. = C_s * K_{La} * Vol.$		

Fuente: Elaboración propia

5.3 MEDICIONES DEL CAUDAL DE AIREACIÓN

En la Tabla 5.3 y el Gráfico 5.3 se presentan las mediciones de calibración y verificación del caudal de aireación suministrado a los MBBRs, aquí se puede apreciar la tendencia continua del sistema a descalibrarse y la disminución en el tiempo del caudal de aireación, siendo para la primera etapa la disminución promedio de 25.1% en el reactor R5% y 15.6% en el reactor R10%, y en la segunda etapa de 14.5% para el reactor R20% y 12.3% para el reactor R40%.

Estas disminuciones del caudal podrían ser indicadores del aumento en las pérdidas de carga en el sistema de aireación, por ejemplo, la obstrucción por acumulación de polvo en el filtro de esponja del equipo, disminución de la sección útil en las líneas por la acumulación de tierra, desgaste y pérdida de eficiencia de la compresora, obstrucciones en los difusores. Considerando esto, en la segunda etapa se procedió a recalibrar el sistema después de la verificación, además de realizarse actividades de mantenimiento, como limpieza de filtros y conducciones, ajustes de las conexiones, con la finalidad de disminuir las pérdidas de cargas.

Tabla 5.3. Resultados de las mediciones del caudal de aireación suministrado a los reactores durante la investigación

Etapas	Fechas de medición	Actividad*	Caudal de aire (L/min)	
			MBBR R5%	MBBR R10%
Etapa N°01	23/04/2018	C	18.00	18.00
	I :09/05/18	V	12.00	13.20
	F:04/10/18	V	9.00	10.80
	29/10/2018	V	6.80	9.90
	Promedio		11.24	12.66
			MBBR R20%	MBBR R40%
Etapa N°02	29/10/2018	C	15.00	15.00
	I :24/10/18	V	8.50	9.50
	F:01/03/19	R	17.60	13.60
	05/02/2019	V	16.20	12.00
	05/02/2019	R	17.60	17.10
	21/03/2019	V	11.70	13.30
	Promedio		12.82	13.18

*C: Calibración, V: Verificación, R: Recalibración. Fuente: Elaboración propia

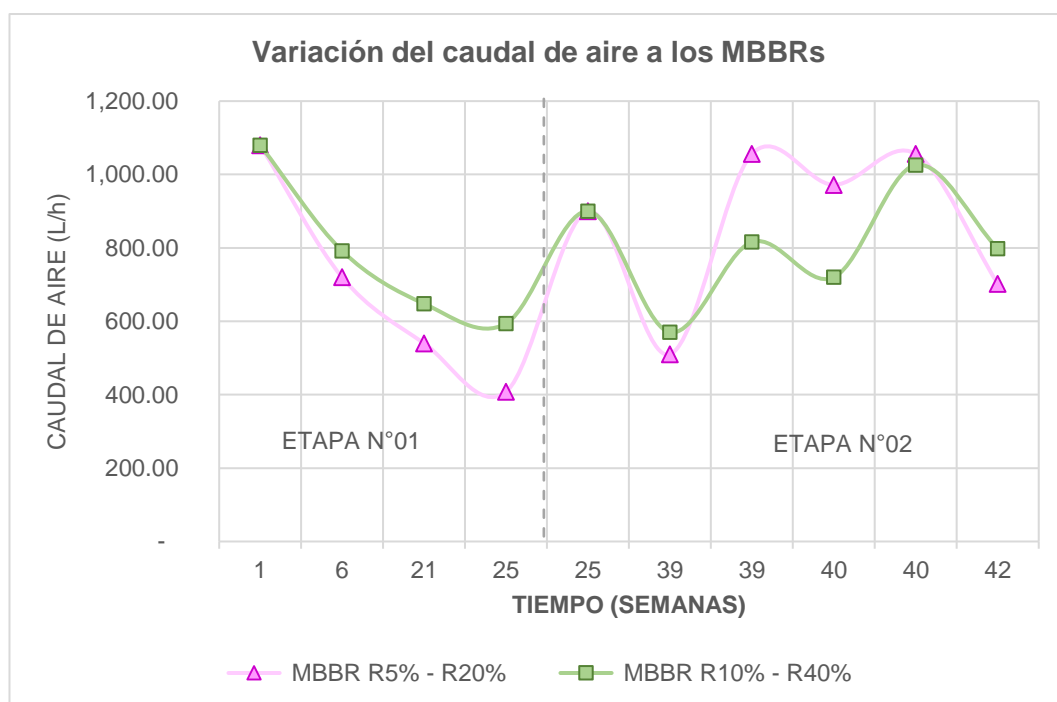


Gráfico 5.3. Variación del caudal de aireación suministrado a los reactores

5.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRAZADORES

Los detalles de los ensayos de trazadores realizados se muestran en la tabla 5.4 y los resultados fueron representados en el Gráfico 5.4.

Tabla 5.4. Detalles de los ensayos de trazadores realizados a los reactores durante la etapa de acondicionamiento del sistema

Detalles	Reactor N°01	Reactor N°02
Fecha de prueba	25/04/18	25/04/18
Temperatura agua (°C)	26.8	26.3
Conductividad agua (mS)	1.342	1.342
Volumen solución madre (L)	2.8	2.8
Sal dosificada a la solución madre (g)	336	672
Caudal de agua aplicado (L/d)	216	216
Caudal de aireación aplicado (L/h)	1080	1080
Tiempo de dosificación de solución madre (1/30 TRH) (min)	18.6	18.6
Conductividad pico esperada en el reactor (mS)	11	8

Fuente: Elaboración propia

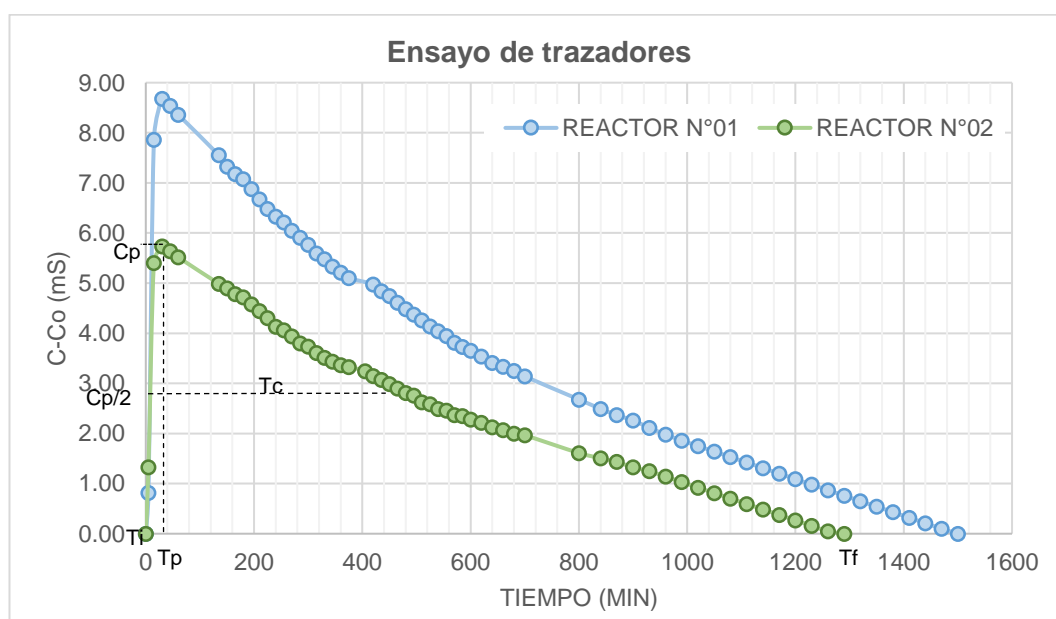


Gráfico 5.4. Variación de la concentración del trazador NaCl medida como conductividad en el reactor N°01 y el reactor N°02

Luego del análisis del Gráfico 5.4 se obtuvieron los detalles de la Tabla 5.5, donde se aprecia que, a pesar de aplicar diferentes concentraciones de trazador sobre los reactores, estos tuvieron un comportamiento similar. El tiempo inicial desde la aplicación del trazador y su aparición en el efluente (T_i) fue instantáneo, las conductividades máximas se presentaron a los 30 minutos (T_p), los tiempos medios de residencia (T_m) fueron de 5.13 horas para el reactor N°01 y 5.38 horas para el reactor N°02, y las relaciones $T_m/T_o < 1$ indican la presencia de cortocircuitos. Las relaciones T_i/T_o , T_p/T_o cercanas a cero y las excentricidades en el orden de 2.3 indican que el flujo predominante en ambos reactores es flujo mezclado ideal.

Tabla 5.5. Resumen de resultados del análisis de la curva tendencia de variación de la concentración del trazador en los reactores

Detalles	Reactor N°01	Reactor N°02
Tf Tiempo de prueba (min)	1500	1290
Ti (min)	Instantáneo	Instantáneo
Tp tiempo modal (min)	30	30
Cp conductividad máxima (mS)	10.02	7.07
Cp – Co (mS)	8.678	5.72
Tm tiempo medio de residencia (min)	322.5	307.5
To Tiempo de retención teórico (min)	558	558
Tc	485	455
Ti/To	0	0
Tm/To	Flujo mezclado 0.578	Flujo mezclado 0.551
Tp/To	Cortocircuito 0.054	Cortocircuito 0.054
Excentricidad: $e = \frac{(T_f - T_p) - (T_p - T_i)}{T_o}$	Predominio flujo mezclado 2.58	Predominio flujo mezclado 2.204
	Existencia del flujo mezclado	Predominio del flujo mezclado

Fuente: Elaboración propia

5.5 MEDICIONES DE LA TURBIEDAD

En la tabla 5.6 se presentan los promedios de las mediciones de la turbiedad y las eficiencias (para ver los valores diarios y los promedios semanales obtenidos ir al anexo N°01 y Gráfico 5.5). Aquí se puede apreciar que las mayores turbiedades afluentes fueron de 318 UNT y 369 UNT durante la etapa N°01 y N°02 respectivamente y las eficiencias de remoción superaron el 90% en ambos casos.

Tabla 5.6. Valores promedio de la turbiedad en los afluentes, reactores y efluentes y eficiencias de remoción alcanzadas

Etapa	Punto de monitoreo	Turbiedad (UNT)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/05/18-04/10/18	Afluente N°01	140.32 ± 54.56	318.00	37.00
	MBBR R5%	66.56 ± 49.21	373.00	13.50
	MBBR R10%	82.38 ± 74.47	384.00	17.30
	Efluente E5%	11.57 ± 4.91	27.10	3.60
	Efluente E10%	10.84 ± 5.07	31.90	3.59
	Eficiencia 5%	91% ± 5%	98%	71%
	Eficiencia 10%	91% ± 5%	98%	76%
Etapa N°02 24/10/18-01/03/19	Afluente N°02	184.44 ± 63.85	369.00	52.20
	MBBR R20%	95.21 ± 46.42	270.00	8.06
	MBBR R40%	81.12 ± 49.47	281.80	19.70
	Efluente E20%	12.25 ± 11.62	46.80	1.24
	Efluente E40%	8.50 ± 5.99	26.90	1.91
	Eficiencia 20%	91% ± 8%	99%	61%
	Eficiencia 40%	93% ± 6%	99%	73%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.6 y el Gráfico 5.5, se aprecia el comportamiento disperso y oscilante de la turbiedad en el afluente, con desviaciones estándar altas de 56 UNT y 63.85 UNT que representaron el 39% y 35% de los valores promedios de cada etapa, notándose esto también en los efluentes, pero en menor escala. Las eficiencias alcanzadas tuvieron un comportamiento

menos disperso con desviaciones estándar que representaron entre el 5% y 9% de las eficiencias promedios.

En la Tabla 5.6, se puede ver también que la turbiedad promedio del afluente en la etapa N°02 tuvo un aumento de 44.12 UNT o el 31.4% respecto de la etapa N°01. Las turbiedades promedio en los reactores fueron bajas, en el rango de 60 a 100 UNT; los valores obtenidos se incrementaron mientras fueron elevados los porcentajes de los lechos móviles en los MBBRs, hasta el valor de 95.21 ± 46.42 UNT alcanzado en el reactor R20%, y disminuyó a 81.12 ± 49.47 UNT en el reactor R40%.

Las turbiedades promedio en los efluentes estuvieron dentro del rango de 8.5 a 12.5 UNT (utilizando la expresión de relación de la turbiedad y los sólidos suspendidos en reactores de lodos activados: $SS, \text{ mg/L} = 2.3 \times (\text{Turbiedad, UNT})$, se estimó que los valores de SST quedarían en el rango aceptable de 19.55 a 28.75 mgSST/L (Metcalf & Eddy, 1995)). El efluente E40% alcanzó el valor más bajo de turbiedad promedio (8.50 ± 5.99 UNT) y la mayor remoción ($93\% \pm 6\%$).

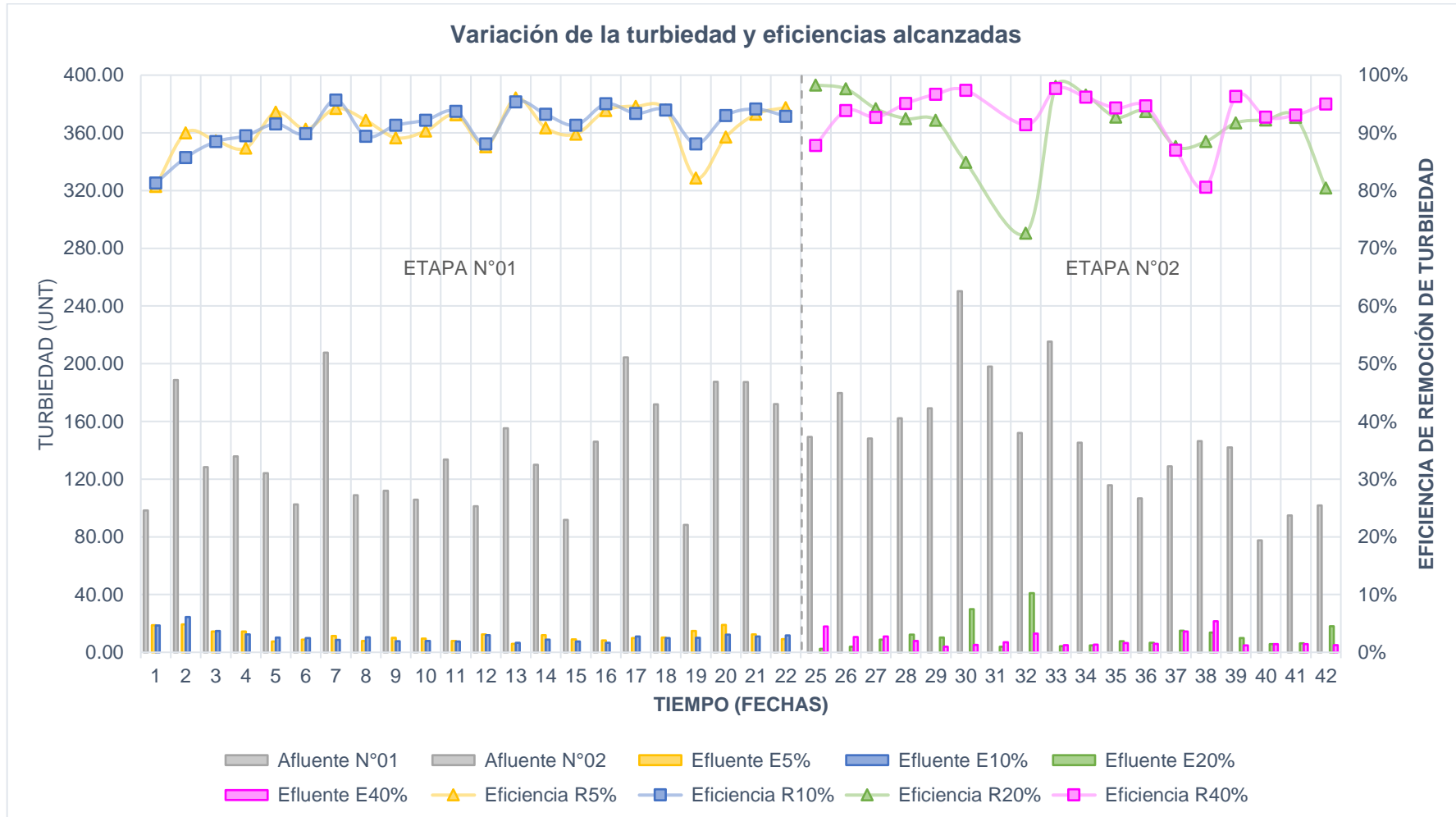


Gráfico 5.5. Variación de la Turbiedad y eficiencias alcanzadas en el afluente y los efluentes durante las etapas N°01 y N°02

5.6 MEDICIONES DEL PH

En la Tabla 5.7 se presenta el resumen de las mediciones del pH; para ver los valores diarios y los promedios semanales obtenidos ir al anexo N°01 y los Gráficos 5.6 y 5.7.

En esta Tabla 5.7, se puede apreciar, para todos los puntos de monitoreo, valores de pH promedios dentro del rango ligeramente alcalino, entre 7.5 a 8. Esta tendencia está asociada con los valores de pH promedios en los afluentes de 7.54 ± 0.45 y 7.77 ± 0.20 durante la etapa N°01 y N°02 respectivamente, los cuales ya se encuentran en dicho rango. Otro detalle apreciable es la baja dispersión de los valores, con desviaciones estándar que representan entre el 2% a 5% de los valores promedios.

Tabla 5.7. Valores promedio, máximos y mínimos del pH en los afluentes, reactores y efluentes

Etapa	Punto de monitoreo	Potencial de Hidrogeno (pH)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/5/18-04/10/18	Afluente N°01	7.54 ± 0.45	8.31	6.78
	MBBR R5%	8.03 ± 0.35	8.68	7.12
	MBBR R10%	7.94 ± 0.30	8.54	7.22
	Efluente E5%	7.93 ± 0.39	8.62	7.18
	Efluente E10%	7.88 ± 0.37	8.69	7.07
Etapa N°02 24/10/18-01/3/19	Afluente N°02	7.77 ± 0.20	8.32	7.42
	MBBR R20%	7.92 ± 0.25	8.38	7.23
	MBBR R40%	7.89 ± 0.23	8.34	7.23
	Efluente E20%	7.98 ± 0.19	8.33	7.57
	Efluente E40%	7.93 ± 0.19	8.24	7.39

Fuente: Elaboración propia

Aquí se aprecia también que el pH promedio del afluente en la etapa N°02 tuvo un ligero aumento de 0.23, pero en ambos casos se ubicó en el rango aceptable (6.5-8.5) para su tratamiento biológico. Los pH promedios en los MBBRs fueron mayores respecto a los afluentes y estuvieron en el rango

de 7.89 a 8.03, dentro del rango adecuado de 7.2-9.0 para los procesos biológicos incluyendo la nitrificación (Metcalf & Eddy, 2003). Los pH promedios en los efluentes se ubicaron dentro del rango de 7.88 a 7.98, similar al de los reactores. Las variaciones de este parámetro no fueron significativas o perjudiciales para el tratamiento.

El comportamiento del pH fue similar en los MBBRs y efluentes investigados en cada etapa. Durante la etapa N°01 los valores del pH presentaron una tendencia gradual a incrementarse, y fueron más estables con una ligera tendencia a disminuir durante la etapa N°02 (ver Gráficos 5.6 y 5.7).

En general, el pH de los MBBRs y los efluentes fue mayor al pH de los afluentes; esto como el resultado del incremento de la actividad biológica en suspensión y el desarrollo de la biopelícula en los portadores, que al degradar la materia orgánica generaron compuestos orgánicos simples con bajas concentraciones de iones H^+ favoreciendo la condición alcalina.

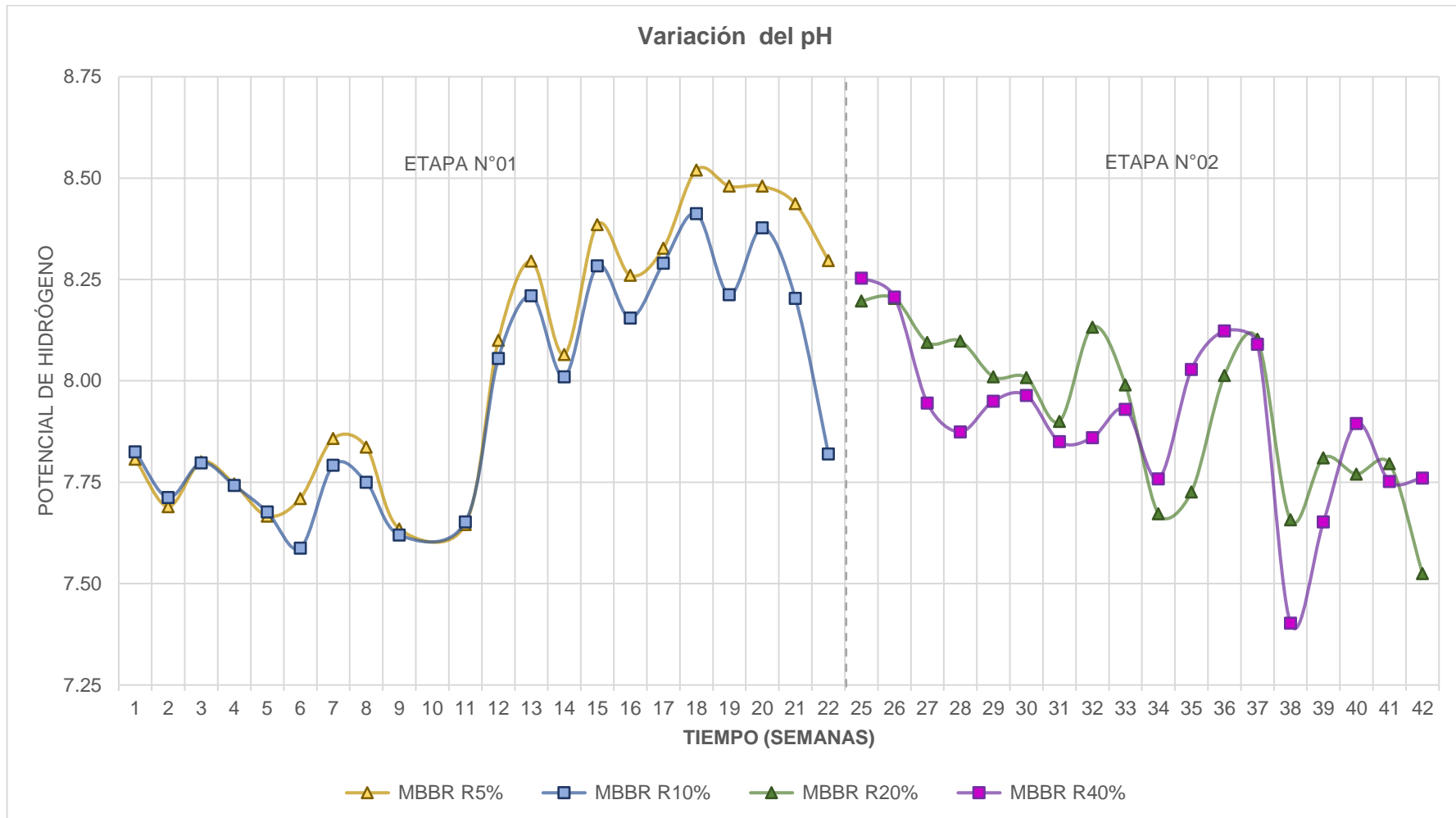


Gráfico 5.7. Variación del pH en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02

5.7 MEDICIONES DE LA TEMPERATURA

En la Tabla 5.8 se presenta el resumen de las mediciones de la temperatura; para visualizar los valores diarios obtenidos y los promedios semanales ver el anexo N°01 y los Gráficos 5.8 y 5.9.

Tabla 5.8. Valores promedio, máximos y mínimos de la temperatura del ambiente, afluentes, MBBRs y efluentes

Etapa	Punto de monitoreo	Temperatura (°C)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/5/18-04/10/18	Ambiente	19.91 ± 2.35	26.80	16.70
	Afluente N°01	19.70 ± 1.81	25.70	17.40
	MBBR R5%	19.35 ± 1.62	24.40	17.20
	MBBR R10%	19.25 ± 1.70	25.60	17.00
	Efluente E5%	19.30 ± 1.72	25.30	17.00
	Efluente E10%	19.23 ± 1.72	25.30	17.00
Etapa N°02 24/10/18-01/3/19	Ambiente	26.72 ± 3.29	33.10	20.40
	Afluente N°02	25.57 ± 2.53	30.70	20.40
	MBBR R20%	25.26 ± 2.56	30.00	20.10
	MBBR R40%	25.05 ± 2.57	30.20	20.00
	Efluente E20%	25.19 ± 2.52	30.00	20.20
	Efluente E40%	25.02 ± 2.49	30.00	20.00

Fuente: *Elaboración propia*

Aquí se puede apreciar dos rangos de temperatura bien marcados: el primero durante la etapa N°01, desarrollada en otoño e invierno, donde las temperaturas promedios estuvieron en el rango de 19 a 20°C, siendo la temperatura promedio del afluente de 19.70 ± 1.81 °C ligeramente mayor a las temperaturas en los reactores y afluentes, las máximas temperaturas se registraron durante el primer mes (mayo 2018) y las mínimas durante el inicio del cuarto mes (agosto 2018); y el segundo durante la etapa N°02, desarrollada en primavera y el verano, donde las temperaturas promedios estuvieron en el rango de 25 a 27°C, siendo la temperatura promedio del afluente de 25.57 ± 2.53 °C, ligeramente mayor a las temperaturas en los

reactores y efluentes, los máximos registros fueron en el cuarto mes (febrero 2019) y los mínimos en el primer mes (octubre 2018).

La temperatura ambiental en la etapa N°01 tuvo registros inferiores a la temperatura del afluente durante los meses de invierno, y en la etapa N°02 registros superiores principalmente en el verano, configurando un comportamiento típico (Metcalf & Eddy, 1995).

Los comportamientos de este parámetro fueron muy similares entre los reactores y efluentes en cada etapa, indicativo de que trabajaron bajo las mismas condiciones ambientales. Considerando que la temperatura ideal para la actividad microbiana está en el rango de 25 a 35 °C, las temperaturas en la etapa N°02, ubicadas en el rango de 20 a 30°C, favorecieron más la actividad biológica y la decantación, pero disminuyeron la solubilidad del oxígeno disuelto y su concentración en los reactores. (Ver Gráficos del 5.8 y 5.9).

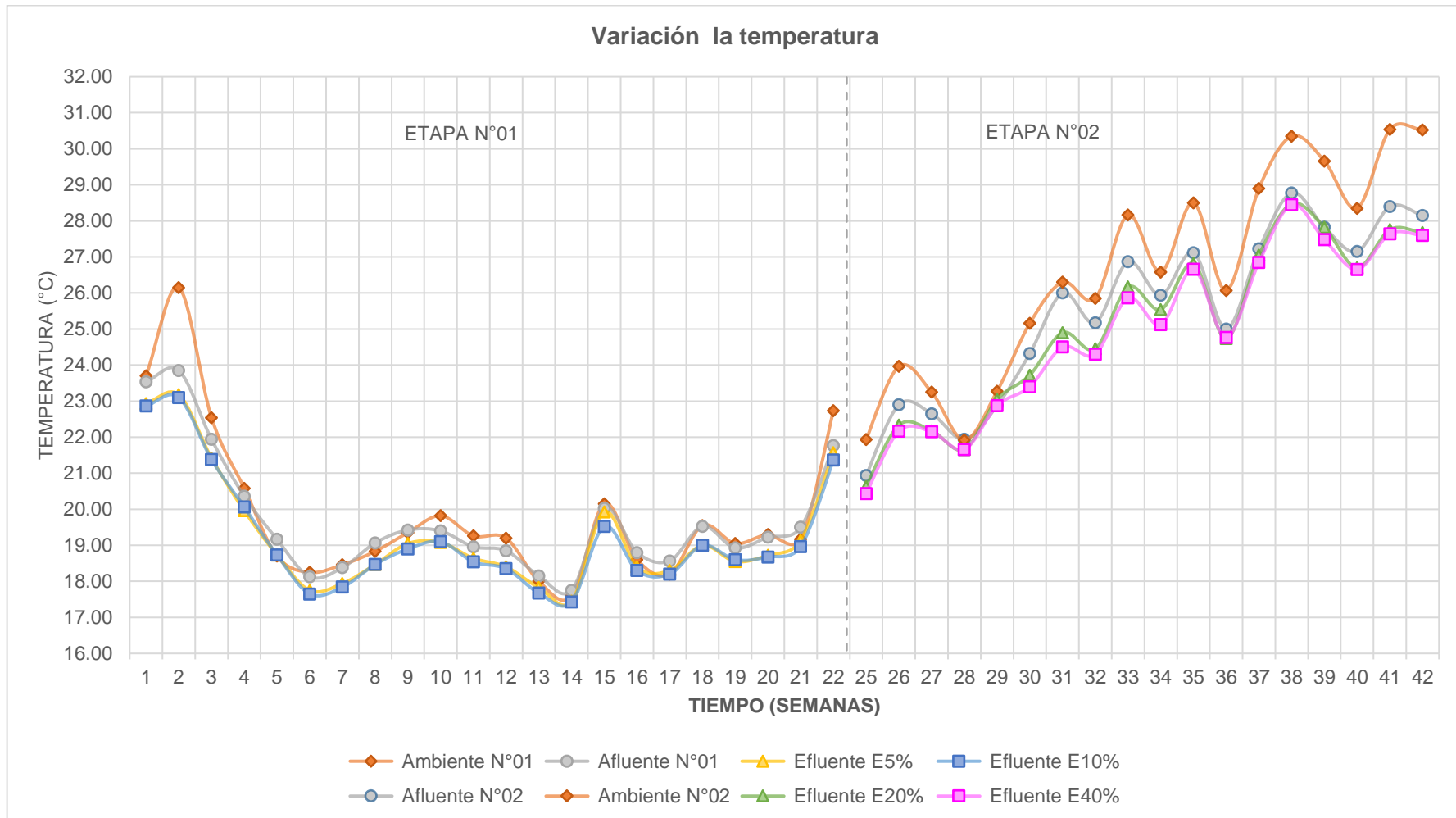


Gráfico 5.8. Variación de la Temperatura ambiental, de los afluentes y efluentes durante las etapas N°01 y N°02

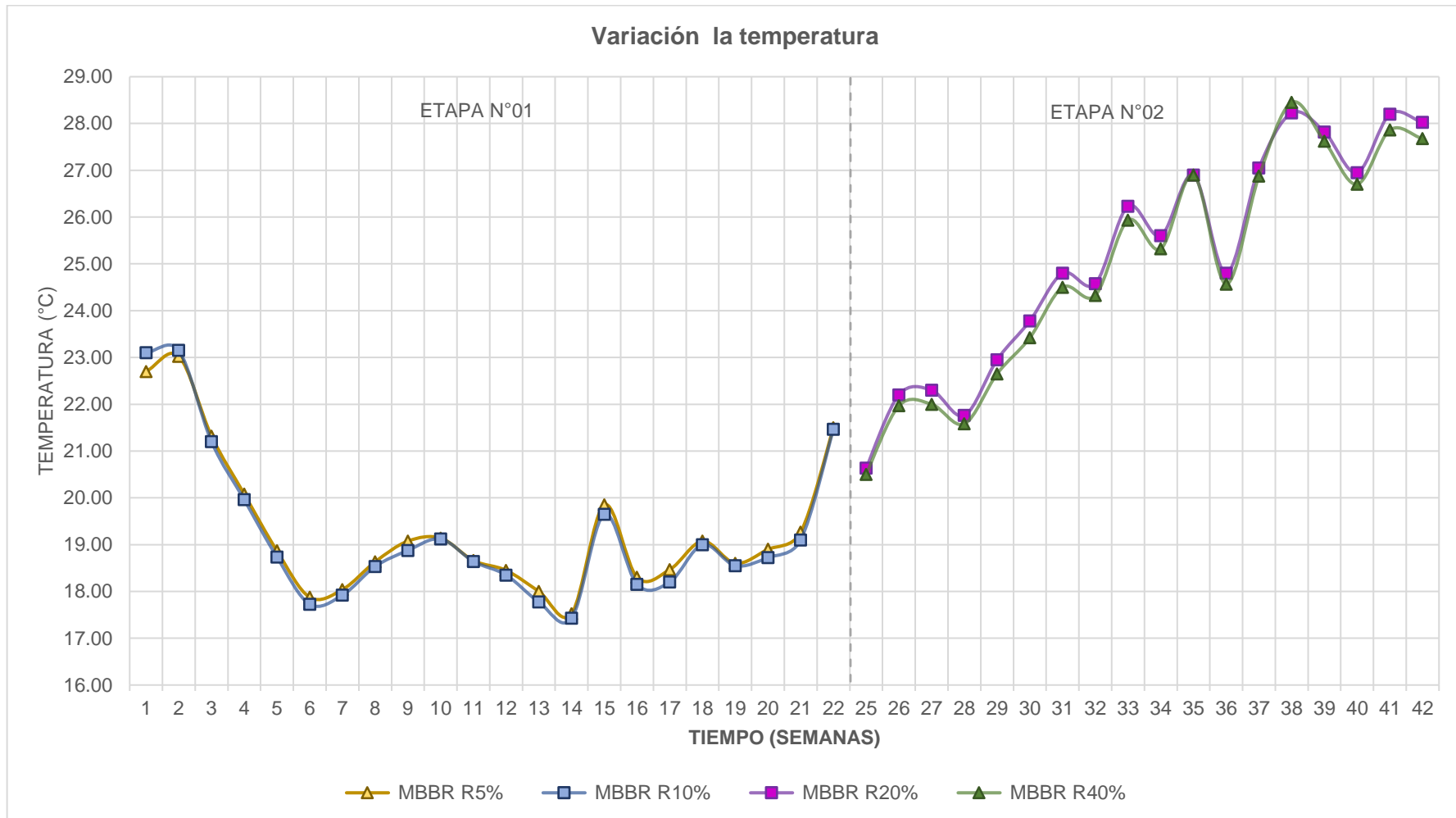


Gráfico 5.9. Variación de la Temperatura en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02

5.8 MEDICIONES DEL OXIGENO DISUELTO

En la Tabla 5.9 se presenta el resumen de las mediciones del O.D.; para visualizar los valores diarios obtenidos y los promedios semanales ver el anexo N°01 y los Gráficos 5.10 y 5.11.

Tabla 5.9. Valores promedio, máximos y mínimos del Oxígeno Disuelto en los afluentes, MBBRs y efluentes

Etapa	Punto de monitoreo	Oxígeno Disuelto (mg/L)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/5/18-04/10/18	Afluente N°01	0.49 ± 0.61	2.15	0.00
	MBBR R5%	6.80 ± 0.96	8.50	3.83
	MBBR R10%	6.87 ± 0.85	8.33	4.34
	Efluente E5%	4.89 ± 1.53	8.21	0.46
	Efluente E10%	5.15 ± 1.57	8.05	0.66
Etapa N°02 24/10/18-01/3/19	Afluente N°02	0.27 ± 0.55	3.46	0.00
	MBBR R20%	5.77 ± 1.32	8.00	2.56
	MBBR R40%	6.06 ± 1.12	8.00	3.87
	Efluente E20%	4.55 ± 1.00	6.47	1.24
	Efluente E40%	5.00 ± 0.88	6.85	2.13

Fuente: Elaboración propia

En esta tabla, se puede apreciar que los valores promedios de O.D. en los afluentes fueron de 0.49 ± 0.61 y 0.27 ± 0.55 mg/L durante la etapa N°01 y N°02 respectivamente, los cuales son característicos para aguas residuales domésticas.

También se puede ver que los registros de O.D. promedio en los MBBRs R5% y R10% durante la etapa N°01 fueron de 6.80 ± 0.96 y 6.87 ± 0.85 mg/L respectivamente, indicando que las condiciones de este parámetro fueron similares; y para los MBBRs 20% y R40% durante la etapa N°02 fueron de 5.77 ± 1.32 y 6.06 ± 1.12 mg/L respectivamente, lo que indica concentraciones ligeramente superiores para el MBBR R40% pero ubicándose en rangos muy similares.

La concentración promedio de O.D. para los efluentes E5% y E10% durante la etapa N°01 fueron de 4.89 ± 1.53 y 5.15 ± 1.57 mg/L respectivamente, y para los efluentes E20% y E40% durante la etapa N°02 fueron de 4.55 ± 1.00 y 5.00 ± 0.88 mg/L respectivamente, ubicándose todos en rangos similares.

Los niveles promedios de O.D fueron mayores durante la etapa N°01, siendo más notorio para los MBBRs donde la diferencia de niveles promedios fue aproximadamente de 1 mg/L (ver Tabla 5.9); esto se puede explicar debido a la influencia inversa de la temperatura y la actividad biológica (mayores en la etapa N°02) en la solubilidad y concentración del O.D. respectivamente. Otro detalle fue el descenso de los niveles promedios de O.D. en los efluentes, en promedio entre 1 a 2 mg/L menor a los niveles en los MBBRs; esto puede atribuirse al lodo activo acumulado en los decantadores el cual demanda de O.D.

Los niveles requeridos de O.D. en los MBBRs son mayores a los trabajados en los procesos de lodos activados, esto debido a que la tecnología incluye procesos de biopelícula, y requiere de mayor energía para mezclar la masa de agua, la materia en suspensión y los portadores. Según Odegaard et al. (1994), se recomienda niveles de entre 2 y 5 mg/L. Durante la investigación se mantuvieron los niveles señalados siempre, siendo en gran parte superiores al máximo recomendado; además los comportamientos de este parámetro fueron parecidos entre los reactores y efluentes en cada etapa, indicativo de que trabajaron bajo condiciones similares de aireación y mezcla. (Ver Gráficos 5.10 y 5.11).

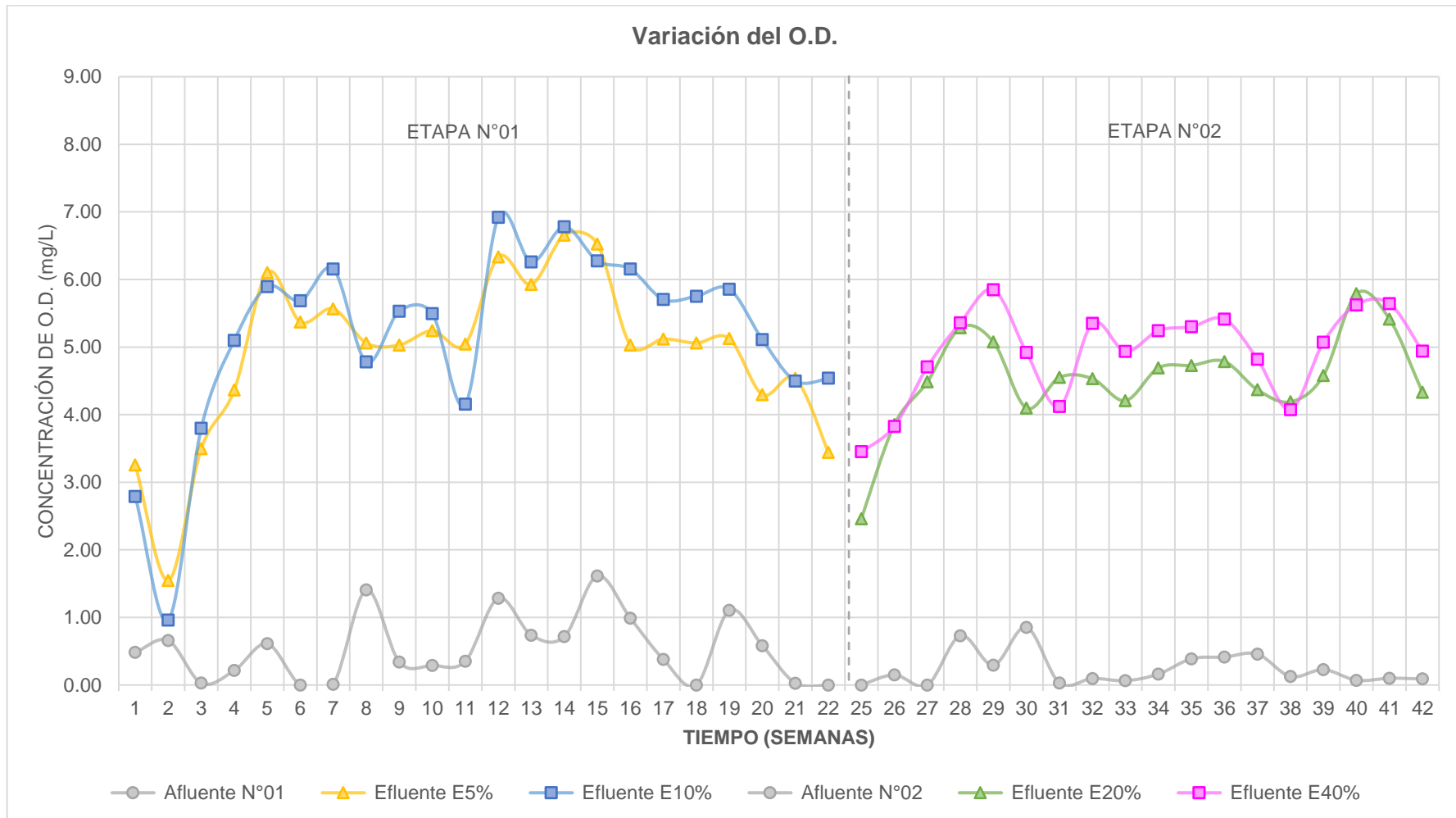


Gráfico 5.10. Variación del Oxígeno disuelto en el afluyente y los efluentes durante las etapas N°01 y N°02

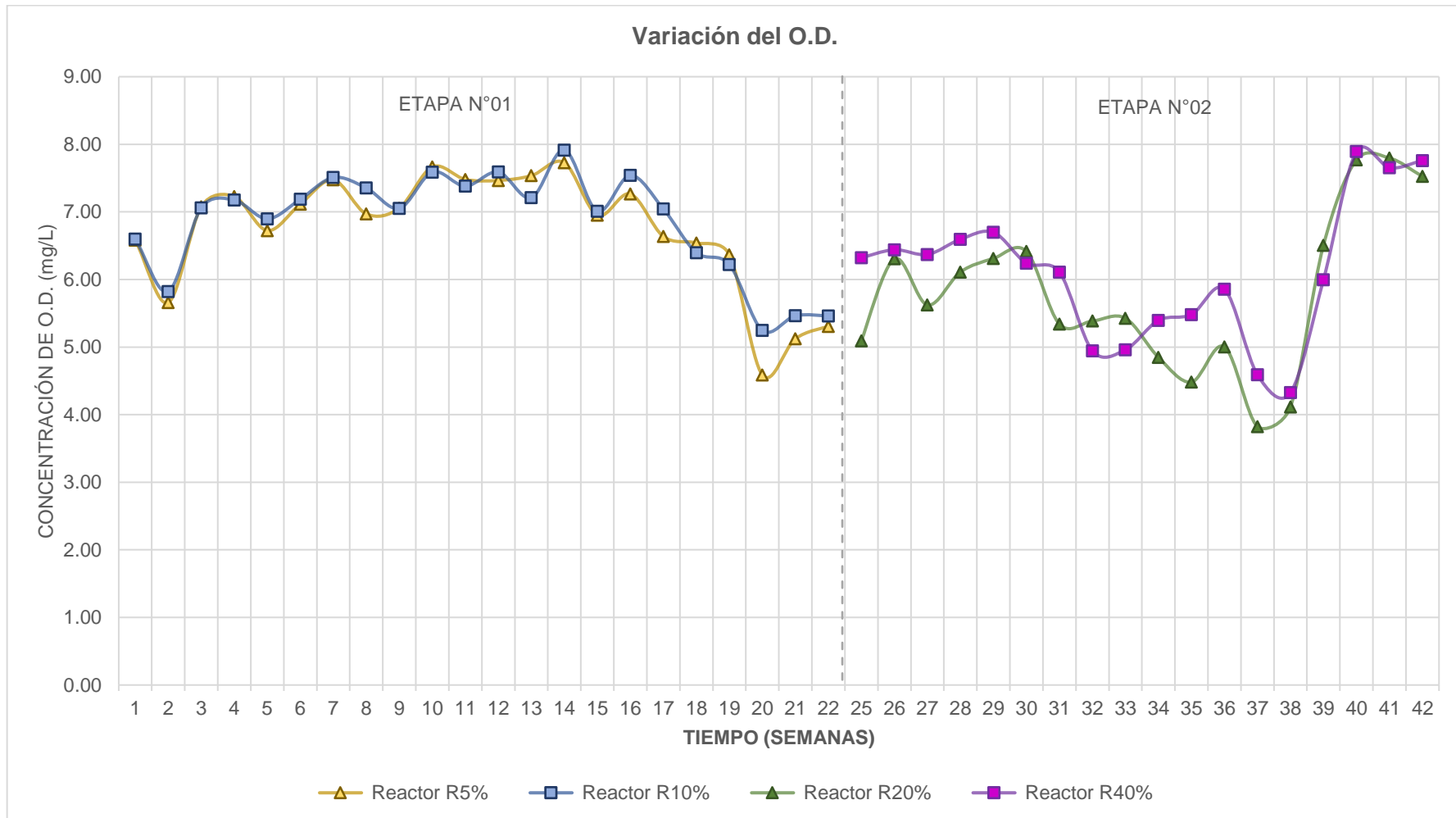


Gráfico 5.11. Variación del Oxígeno disuelto en los MBBRs durante las etapas N°01 y N°02

5.9 MEDICIONES DE LA DBO₅

En la Tabla 5.10 se presenta el resumen de las mediciones de la DBO₅; para visualizar los valores semanales obtenidos ver el Gráfico 5.14 y el anexo N°02. En esta tabla, se puede apreciar que los valores promedios de la DBO₅ en los afluentes fueron 132.92 ± 23.52 y 160.09 ± 19.29 mg/L en la etapa N°01 y N°02 respectivamente; aunque el valor promedio en la última etapa se incrementó en un 20% respecto de la primera, las concentraciones de la DBO₅ se mantuvieron dentro de un rango característico para las aguas residuales domésticas débiles y medias (Metcalf & Eddy, 1995). La dispersión de este parámetro fue baja, con desviaciones estándar que representaron el 17.7% y 12% del valor promedio en la etapa N°01 y N°02 respectivamente.

Tabla 5.10. Resumen de las mediciones de la DBO₅ y las eficiencias de remoción alcanzadas durante la investigación

Etapa	Punto de monitoreo	DBO ₅ (mg/L)		
		Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/05/18-4/10/18	Afluente N°01	132.92 ± 23.52	175.28	87.90
	Efluente E5%	18.48 ± 6.36	26.86	6.11
	Efluente E10%	20.33 ± 7.98	35.76	8.71
	Eficiencia E5%	$86\% \pm 5\%$	95.66%	77.87%
	Eficiencia E10%	$84\% \pm 7\%$	93.82%	67.39%
Etapa N°02 24/10/18-1/03/19	Afluente N°02	160.09 ± 19.29	192.00	115.44
	Efluente E20%	23.18 ± 19.76	60.01	3.09
	Efluente E40%	19.58 ± 15.41	54.37	0.02
	Eficiencia E20%	$86\% \pm 12\%$	97.87%	65.09%
	Eficiencia E40%	$88\% \pm 10\%$	99.98%	64.10%

Fuente: *Elaboración propia*

La relativa estabilidad de este parámetro se puede también apreciar en el Gráfico 5.13. Considerando que la DBO₅ fue una variable independiente, contar con el tanque de homogenización permitió evitar concentraciones elevadas picos durante la investigación. Factores como las estaciones,

otoño-invierno en la etapa N°01 y primavera-verano en la etapa N°02, y/o la diferencia de horarios de bombeo y llenados del tanque, principalmente horarios matutinos en la etapa N°01 y horarios vespertinos en la etapa N°02 (ver 4.2.2), pudieron influenciar en el incremento de la concentración promedio de la DBO_5 en la etapa N°02.

En la Tabla 5.10, también se observa que los valores promedios de la DBO_5 fueron 18.48 ± 6.36 , 20.33 ± 7.98 , 23.18 ± 19.76 y 19.58 ± 15.41 mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente; estos valores son similares entre sí, aunque presentan una mayor dispersión en la etapa N°02. Se aprecia también que los porcentajes de remoción promedio de la DBO_5 fueron $86 \pm 5\%$, $84 \pm 7\%$, $86 \pm 12\%$ y $88 \pm 10\%$ para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente. En la variación semanal de los porcentajes de remoción de los efluentes; los desempeños superan el 90% en varias semanas. (Ver Gráfico 5.14)

Las eficiencias de remoción de DBO_5 alcanzadas en diversas investigaciones en MBBRs variaron entre 85 a 95% (Odegaard,1994; Minegatti, 2008), siendo valores similares a las eficiencias promedios alcanzadas en la investigación y a las estimadas para los procesos de lodos activados.

Con la finalidad de realizar una mejor comparación de los resultados se deben incluir las condiciones operativas de los MBBRs, expresadas en términos de cargas aplicadas. Considerando esto, en la Tabla 5.11 se presenta el resumen de las cargas orgánicas aplicadas en términos de la DBO_5 . Aquí se observa que los valores promedios de carga orgánica aplicada a los MBBRs fueron 28.71 ± 5.08 y 34.58 ± 4.17 g DBO_5 /d en la etapa N°01 (R5%-R10%) y N°02 (R20%-R40%) respectivamente; el valor mínimo fue 18.99 g DBO_5 /d en la etapa N°01 y el máximo fue 41.47 g DBO_5 /d en la etapa N°02. El incremento del promedio en la segunda etapa ocurrió por el aumento en la concentración de la DBO_5 . Ambos promedios fueron pequeños y guardaron relación con la escala de

laboratorio de la investigación, considerando que el caudal aplicado constante fue 216 L/d.

Tabla 5.11. Resumen de las cargas orgánicas aplicadas a los MBBRs durante la investigación (en términos de la DBO₅)

Carga Aplicada	MBBRs	Promedio	Máximo	Mínimo
C. Orgánica (gDBO ₅ /d)	R5% -R10%	28.71 ± 5.08	37.86	18.99
	R20% -R40%	34.58 ± 4.17	41.47	24.94
C. Orgánica Volumétrica (kgDBO ₅ /m ³ ·d)	R5% -R10%	0.34 ± 0.06	0.45	0.23
	R20% -R40%	0.41 ± 0.05	0.49	0.30
C. Orgánica Superficial (gDBO ₅ /m ² ·d)	R5%	25.59 ± 4.53	33.75	16.92
	R10%	12.80 ± 2.26	16.87	8.46
	R20%	7.71 ± 0.93	9.24	5.56
	R40%	3.85 ± 0.46	4.62	2.78

Fuente: *Elaboración propia*

La carga orgánica volumétrica (COV) es ampliamente usado para el diseño y control de los procesos de lodos activados; en los MBBRs, su determinación permite establecer un símil con estos procesos. De la tabla 5.11, se aprecia que los valores promedios de COV aplicada a los MBBRs durante la investigación fueron 0.34 ± 0.06 y 0.41 ± 0.05 kgDBO₅/m³·d en la etapa N°01 (R5%-R10%) y N°02 (R20%-R40%) respectivamente; el valor mínimo fue 0.23 kgDBO₅/m³·d durante la etapa N°01 y el máximo fue 0.49 kgDBO₅/m³·d en la etapa N°02.

En el Gráfico 5.12 se presentan todas las COV trabajadas durante la investigación y los respectivos porcentajes de remoción de COV logrados. Existe gran variabilidad en las eficiencias alcanzadas desde 64% hasta superiores a 95%. Los MBBRs R20% y R40% alcanzaron eficiencias de remoción de 97.10% y 97.61% respectivamente, bajo una COV de 0.49 kgDBO₅/m³·d; y los MBBRs R5% y R10% alcanzaron eficiencias de remoción de 91.08% y 92.24% bajo una COV de 0.45 kgDBO₅/m³·d.

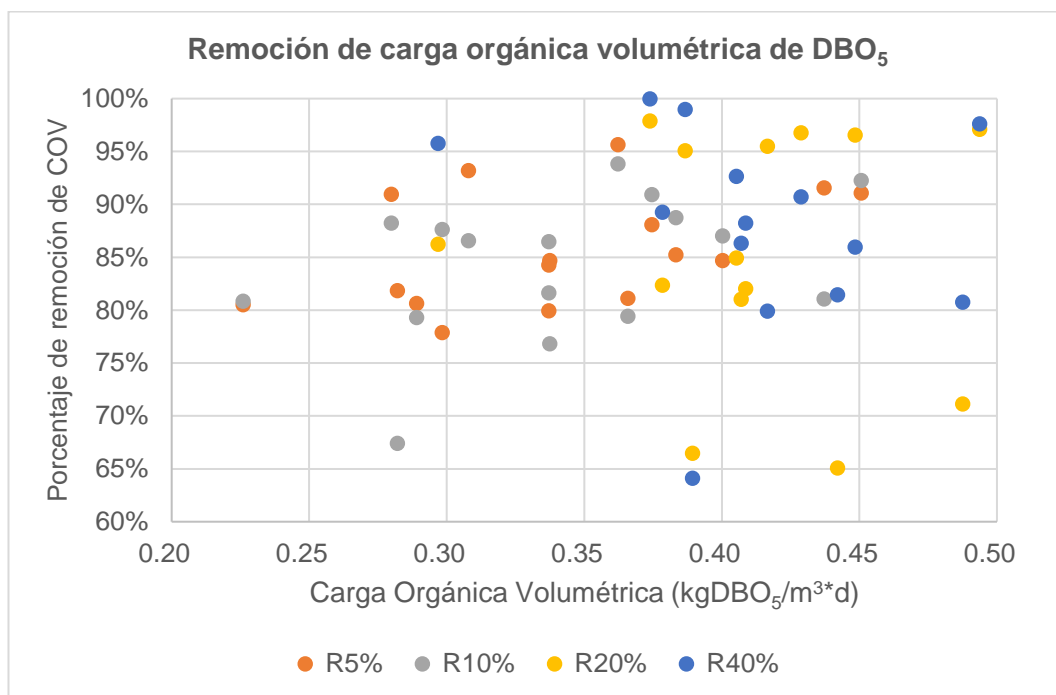


Gráfico 5.12. Variación de la remoción de COV aplicada en los MBBRs (en términos de la DBO₅)

Estos resultados muestran que los MBBRs estudiados tuvieron una capacidad similar a los procesos de lodos activados convencionales, cuyas COV están en el rango de 0.30 a 0.60 kgDBO₅/m³·d y eficiencias entre 85% a 95%; y superior a los procesos de aireación prolongada, cuyas COV están en el rango de 0.1 a 0.4 kgDBO₅/m³·d y eficiencias entre 85% a 95%.

La carga orgánica superficial (COS) es un parámetro de diseño y operacional asociado a los MBBRs, de la Tabla 5.11, se aprecia que los valores promedios de COS aplicadas en la investigación fueron 3.85 ± 0.46 , 7.71 ± 0.93 , 12.80 ± 2.26 y 25.59 ± 4.53 gDBO₅/m²·d para los MBBRs R40%, R20%, R10% y R5% respectivamente; el valor mínimo fue 2.78 gDBO₅/m²·d aplicado al MBBR R40%, y el máximo fue 33.75 gDBO₅/m²·d aplicado al MBBR R5%.

En el Gráfico 5.13 se presentan todas las COS trabajadas durante la investigación y los respectivos porcentajes de remoción logrados. Los MBBRs R20% y R40% alcanzaron eficiencias de remoción de 97.10% y

97.61% respectivamente, bajo una COS de 9.24 y 4.62 gDBO₅/m²·d respectivamente. Los MBBRs R5% y R10% alcanzaron eficiencias de remoción de 91.08% y 92.24% bajo una COS de 33.75 y 16.87 gDBO₅/m²·d respectivamente.

Investigaciones en MBBRs trabajaron en diferentes rangos de COS: 20 gDBO₅/m²·d (Odegaard et al., 1993), 0.6-15 gDBO₅/m²·d (Rusten et al., 1997), 4-14 gDBO₅/m²·d (Minegatti, 2008). Los resultados muestran que en la investigación el rango de trabajo fue amplio: 2.78-33.75 gDBO₅/m²·d (ver Gráfico 5.13); y para COS entre 20-34 gDBO₅/m²·d, el MBBR R5% logro eficiencias entre el 78-96%.

En el Gráfico 5.13 también se observa que el rango de trabajo para el MBBR R40%, en términos de la COS, fue el menor, entre 2.78-4,62 gDBO₅/m²·d, esto debido a que conto con mayor cantidad de lechos móviles y en consecuencia mayor área de soporte para la biopelícula. Esto podría indicar que este MBBR tiene una capacidad disponible que podría ser evaluada incrementando la COV aplicada, pero se debe tener en cuenta que se deberán analizar otros factores como la aireación y la decantación.

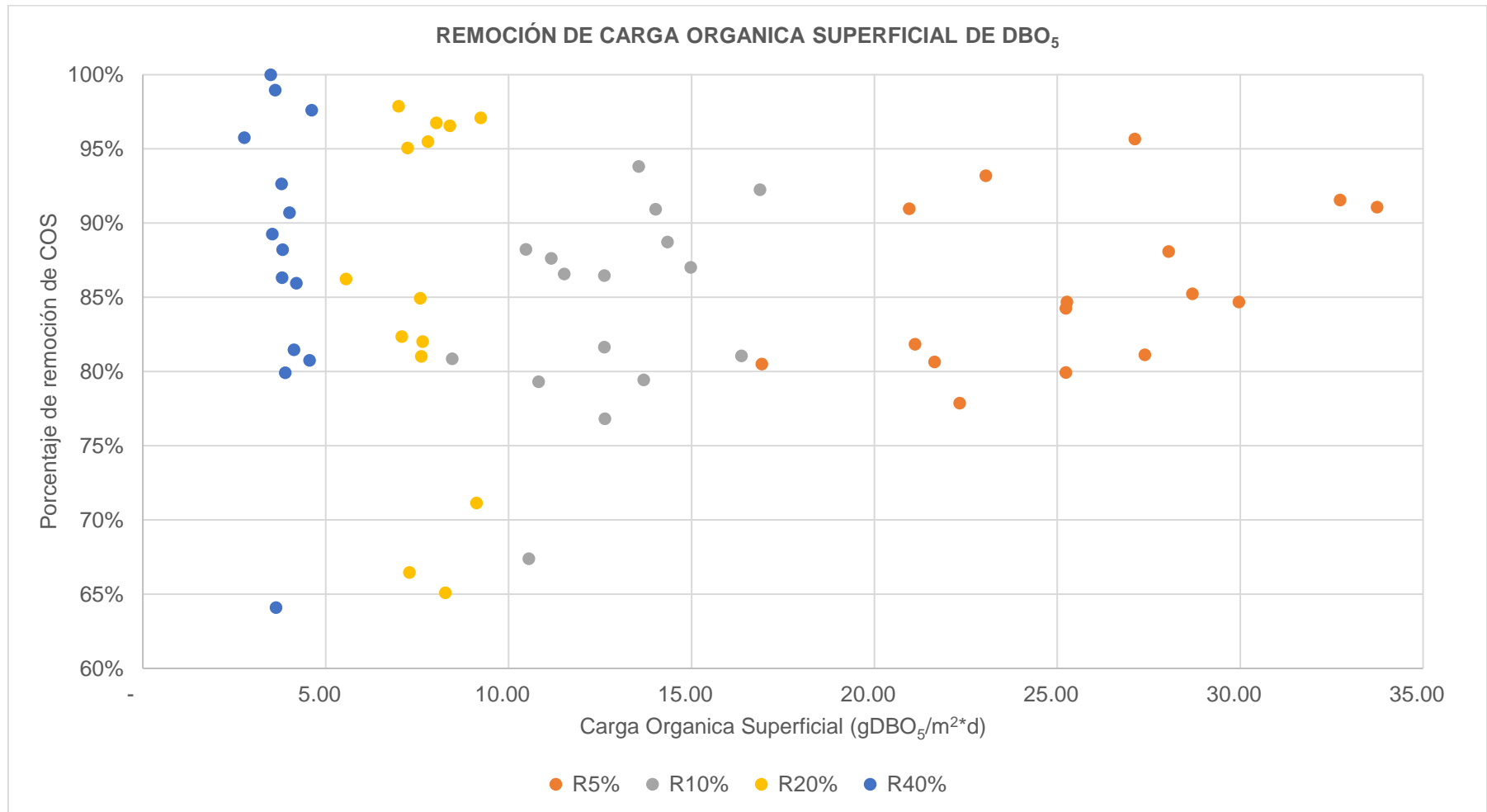


Gráfico 5.13. Variación de la remoción de COS aplicada en los MBBRs (en términos de la DBO₅)

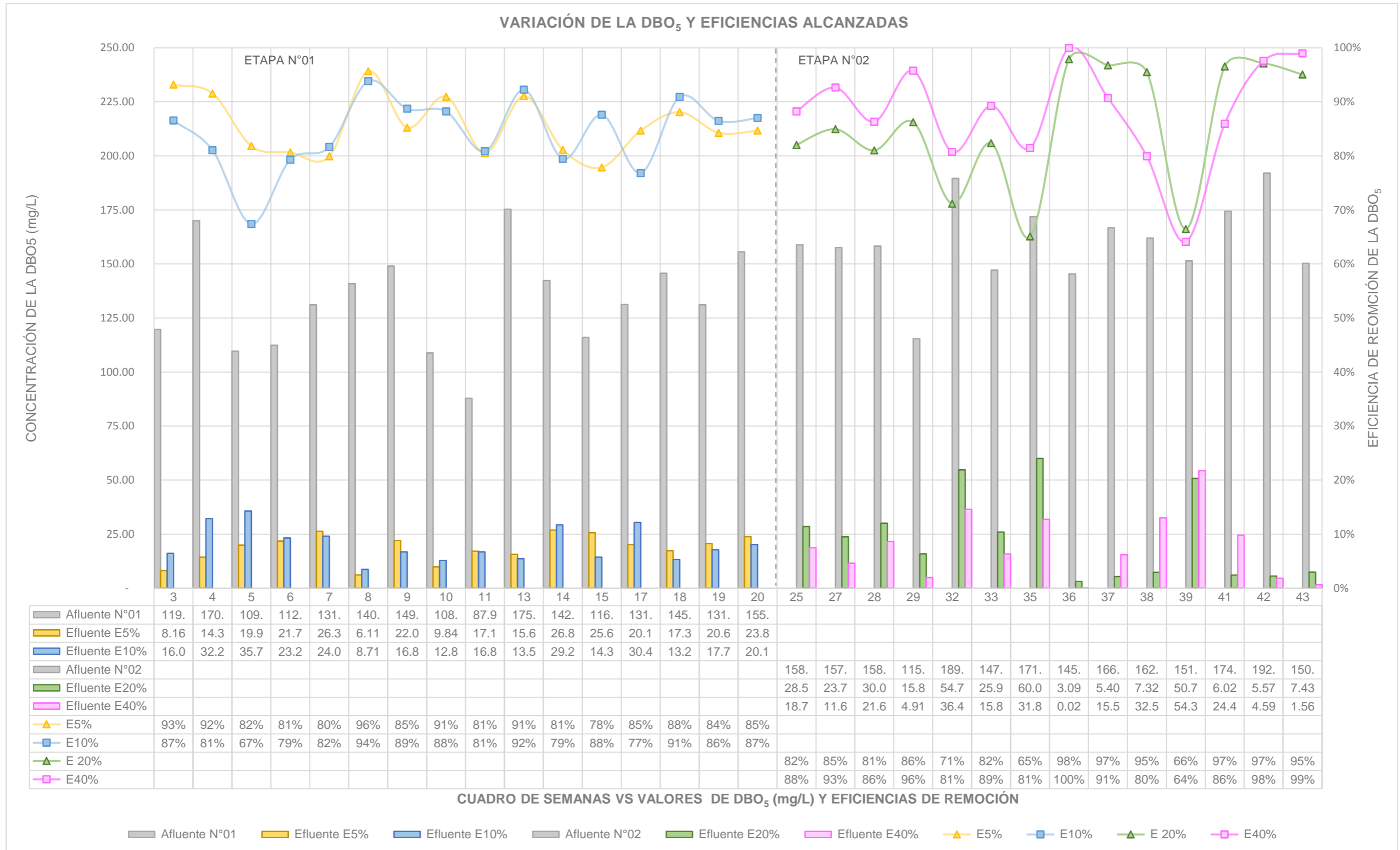


Gráfico 5.14. Variación de la DBO₅ en el afluente y efluentes y eficiencias alcanzadas durante las Etapa N°01 y N°02

5.10 MEDICIONES DE LA DQO

En la Tabla 5.12 se presenta el resumen de las mediciones de la DQO y las respectivas eficiencias de remoción alcanzadas; para visualizar los valores semanales obtenidos ver el Gráfico 5.17 y el anexo N°02. Aquí se puede apreciar que los valores promedios de la DQO en los afluentes fueron 260.46 ± 42.46 y 362.10 ± 33.93 mg/L en la etapa N°01 y N°02 respectivamente; aunque el valor promedio de la DQO en la última etapa se incrementó en un considerable 39.02% respecto de la primera, las concentraciones de la DQO se mantuvieron dentro de los límites característicos para las aguas residuales domésticas débiles y medias (Metcalf & Eddy, 1995). La dispersión de este parámetro fue baja, con desviaciones estándar que representaron el 17.84% y 9.37% del valor promedio en la etapa N°01 y N°02 respectivamente.

Tabla 5.12. Resumen de las mediciones de la DQO durante la investigación

Etapas	Punto de monitoreo	Promedio	Máximo	Mínimo
Etapa N°01 09/05/18-4/10/18	Afluente	260.46 ± 42.46	353.00	223.00
	Efluente E5%	76.38 ± 18.35	122.00	55.00
	Efluente E10%	81.69 ± 38.59	166.00	53.00
	Eficiencia E5%	$70\% \pm 10\%$	79%	46%
	Eficiencia E10%	$68\% \pm 17\%$	79%	28%
Etapa N°02 24/10/18-1/03/19	Afluente	362.10 ± 33.93	444.00	333.00
	Efluente E20%	86.20 ± 53.37	218.00	37.00
	Efluente E40%	90.50 ± 45.68	175.00	34.00
	Eficiencia E20%	$77\% \pm 12\%$	89%	51%
	Eficiencia E40%	$75\% \pm 11\%$	90%	61%

Fuente: *Elaboración propia*

Se observa en el Gráfico 5.17 una relativa estabilidad y la ausencia de concentraciones elevadas o picos para la DQO durante la investigación, esto podría ser explicado por los mismos factores que influyeron en el similar comportamiento de la DBO_5 en el afluente. Comparando los

resultados de la relación DBO_5/DQO en el afluente (ver anexo N°02) se obtiene que fue en promedio $51.71 \pm 5.73\%$ y $44.73 \pm 2.27\%$ para la etapa N°01 y N°02 respectivamente, manteniéndose en ambos casos en el rango de desecho biodegradable ($DBO_5/DQO > 0.4$).

De la Tabla 5.12, se observa también que, los valores promedios de la DQO fueron 76.38 ± 18.35 , 81.69 ± 38.59 , 86.20 ± 53.37 y 90.50 ± 45.68 mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente. Se aprecia también que los porcentajes de remoción promedio de la DQO fueron $70\% \pm 10\%$, $68\% \pm 17\%$, $77\% \pm 12\%$ y $75\% \pm 11\%$ para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente. En el Gráfico 5.17, adicionalmente, se observa la variación semanal de los porcentajes de remoción de la DQO para los efluentes; los desempeños fueron muy variables y se estabilizaron en el último mes de cada etapa.

Para realizar una mejor comparación de estos resultados se deben incluir las condiciones operativas de los MBBRs, como los caudales aplicados, volúmenes de los reactores y la cantidad de lechos móviles, expresadas en términos de cargas aplicadas. Considerando esto, en la Tabla 5.13 se presenta el resumen de las cargas orgánicas aplicadas en términos de la DQO; para visualizar todos los valores obtenidos ver los Gráficos 5.15 y 5.16 y el anexo N°02.

En la Tabla 5.13, se observa que los valores promedios aplicados de carga másica fueron 56.26 ± 9.17 y 78.21 ± 7.33 gDQO/d en la etapa N°01 (R5%-R10%) y N°02 (R20%-R40%) respectivamente; el valor mínimo fue 48.17 gDQO/d en la etapa N°01 y el máximo fue 95.90 gDQO/d en la etapa N°02. El incremento del promedio en la segunda etapa ocurrió por el aumento en la concentración de la DQO. Ambos promedios fueron pequeños y guardaron relación con la escala de laboratorio de la investigación, considerando que el caudal aplicado constante fue 216 L/d.

Tabla 5.13. Resumen de las cargas orgánicas aplicadas durante la investigación
(en términos de la DQO)

Carga Aplicada	MBBRs	Promedio	Máximo	Mínimo
C. Orgánica (gDQO/d)	R5% - R10%	56.26 ± 9.17	76.25	48.17
	R20% - R40%	78.21 ± 7.33	95.90	71.93
C. Orgánica Volumétrica (kgDQO/m ³ .d)	R5% - R10%	0.67 ± 0.11	0.91	0.57
	R20% - R40%	0.93 ± 0.09	1.14	0.86
C. Orgánica Superficial (gDQO/m ² .d)	R5%	50.15 ± 8.18	67.97	42.94
	R10%	25.07 ± 4.09	33.98	21.47
	R20%	17.43 ± 1.63	21.37	16.03
	R40%	8.71 ± 0.82	10.69	8.01

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.13, se presentan también los valores promedios de la carga orgánica volumétrica (COV), en términos de la DQO, aplicada a los MBBRs; estos fueron 0.67 ± 0.11 y 0.93 ± 0.09 kgDQO/m³.d en la etapa N°01 (R5%-R10%) y N°02 (R20%-R40%) respectivamente, con un rango de [0.57-1.14] kgDQO/m³.d.

En el Gráfico 5.15, se presentan todas las COV (en términos de la DQO) trabajadas durante la investigación versus sus respectivos porcentajes de remoción logrados por los MBBRs estudiados. Existe gran variabilidad en las eficiencias alcanzadas desde 28% hasta superiores a 85%. Los reactores R20% y R40% alcanzaron eficiencias de remoción de 89.43% y 90.0% respectivamente, bajo una COV de 0.90 kgDQO/m³.d; y los reactores R5% y R10% alcanzaron eficiencias de remoción de 78.83% y 79.20% respectivamente, bajo una COV de 0.71 kgDQO/m³.d.

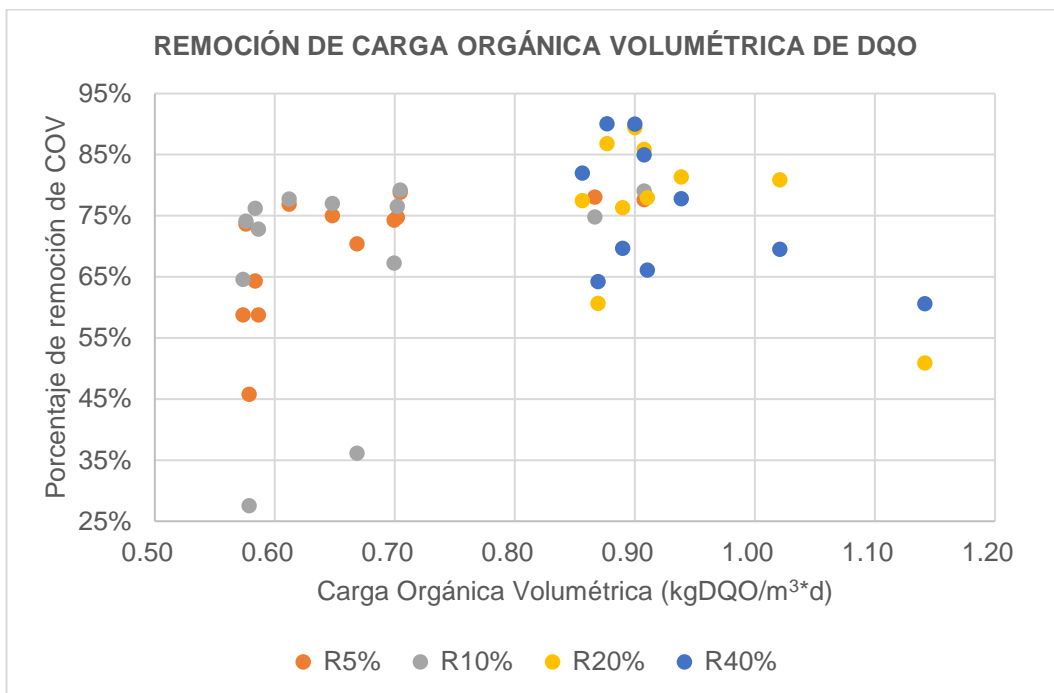


Gráfico 5.15. Variación de la remoción de COV aplicada en los MBBRs (en términos de la DQO)

Diversas investigaciones en MBBRs utilizaron COV aplicadas dentro del rango de $[0.0088;4]$ kgDQO/m³·d. alcanzando diferentes eficiencias. Odegaard et al. (1994) trabajo con COV de 4 kgDQO/m³·d y logró eficiencias entre 70 a 85%. Borghei & Hosseini (2004) trabajaron con COV de 0.088 kgDQO/m³·d y lograron eficiencias de 96%. Minegatti (2008) trabajo con COV de 1.2 kgDQO/m³·d y logro eficiencias del 81%. En la presente investigación, el mejor rango de trabajo para la COV se ubicó entre 0.85-1.02 kgDQO/m³·d donde se alcanzaron las mayores eficiencias para todos los reactores estudiados. (Ver Gráfico 5.15).

Finalmente, en la Tabla 5.13, se aprecian los valores promedios de carga orgánica superficial (COS), en términos de la DQO, aplicada a los MBBRs; estos fueron 50.15 ± 8.18 , 25.07 ± 4.09 , 17.43 ± 1.63 y 8.71 ± 0.82 gDQO/m²·d para los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente. En el Gráfico 5.16 se presentan todas las COS trabajadas en la investigación versus los respectivos porcentajes de remoción logrados. Los MBBRs R20% y R40% alcanzaron eficiencias de 89.43% y 90.0%

correspondientes a COS de 16.85 y 8.42 gDDQ/m²-d, y los reactores R5% y R10% alcanzaron eficiencias de 78.83% y 79.19% bajo una bajo una COS de 52.75 y 26.38 gDDQ/m²-d respectivamente.

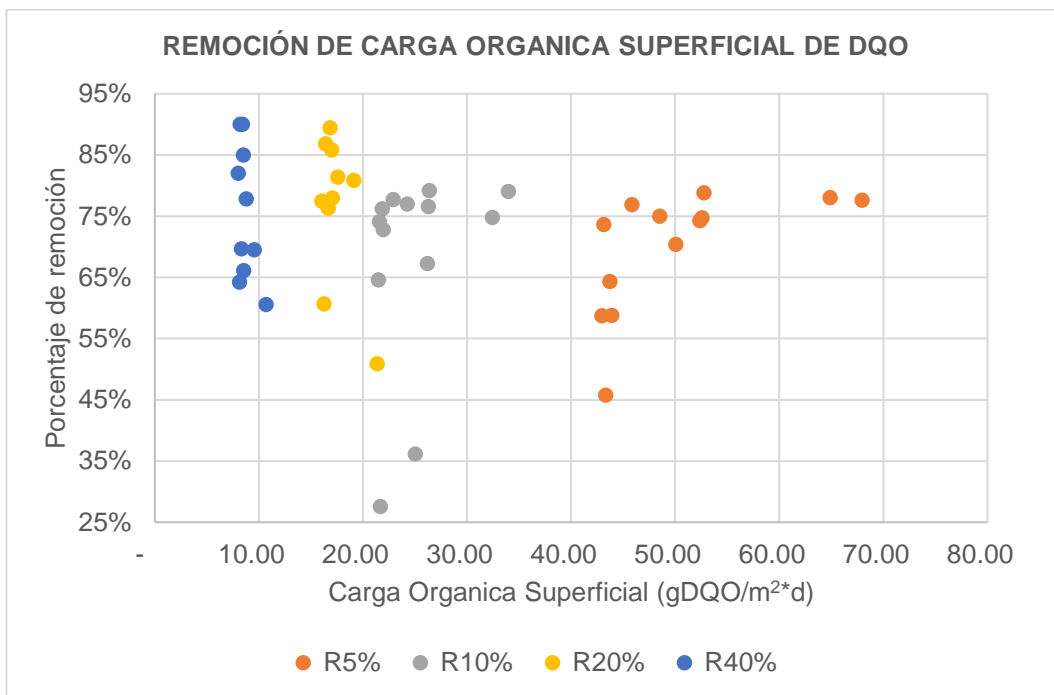


Gráfico 5.16. Variación de la remoción de COS aplicada en los reactores (en términos de la DQO)

Odegaard et al.(1994) logro buenas eficiencias de remoción para valores de COS inferiores a 21 gDQO/m²-d.; Orantes & Martínez (2010) trabajaron con COS entre 2.3 y 35.7 gDQO/m²-d alcanzando eficiencias de 81%. En la investigación, el rango de trabajo de la COS fue [8.01; 67.97] gDQO/m²-d., con las mayores eficiencias de remoción de COS logradas por los reactores R40% y R20% cuando se les aplico cargas inferiores a 20 gDQO/m²-d. La máxima COS fue 67.97 gDDQ/m²-d, aplicada al reactor R5% y logro una eficiencia de 77.62%. (Ver Gráfico 5.16).

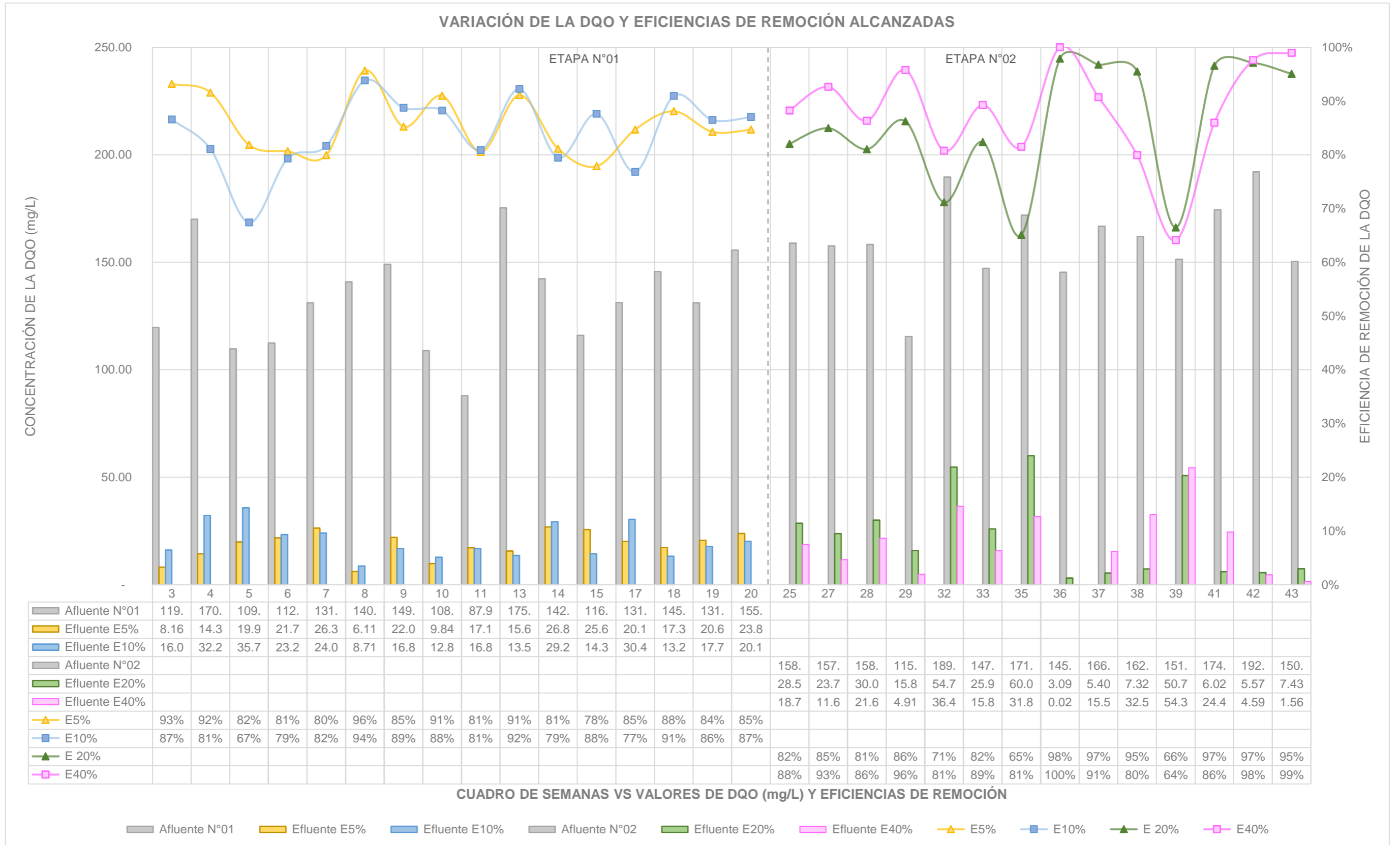


Gráfico 5.17. Variación de la DQO en los afluentes y efluentes VS eficiencias de remoción alcanzadas durante las Etapas N°01 y N°02

5.11 MEDICIONES DEL NTK, NITRITOS Y NITRATOS

En la Tabla 5.14 se presentan los resultados de las mediciones del Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Nitritos, Nitratos, Nitrógeno Total y las eficiencias de remoción alcanzadas en cada caso. Aquí se puede apreciar que los valores del NTK para los afluentes fueron 44.64 y 40.05 mg/L en el final de la etapa N°01 y N°02 respectivamente; ambas concentraciones fueron muy cercanas y se mantuvieron en el rango característico de aguas residuales domésticas medias (Metcalf & Eddy, 1995). Se observa también que los valores de NTK fueron 31.58, 26.23, 8.25 y 5.90 mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente.

Tabla 5.14. Resultados de las mediciones de NTK, Nitritos, Nitratos y Nitrógeno Total en la investigación

Etapa	Punto de monitoreo	NTK (NH ₃ ⁺ - N mg/L)	Nitritos (NO ₂ ⁻ -N mg/L)	Nitratos (NO ₃ ⁻ - N mg/L)	Nitrógeno Total (N mg/L)
	Afluente	44.64	0.003	25.4	70.04
Etapa N°01	Efluente E5%	31.58	0.036	4.3	35.92
21-09-2018	Efluente E10%	26.23	0.685	5.7	32.62
Semana 20	Eficiencia E5%	29.26%	-	83.07%	48.72%
	Eficiencia E10%	41.24%	-	77.56%	53.44%
	Afluente	40.05	22.49	35	97.54
Etapa N°02	Efluente E20%	8.25	5.78	26.1	40.13
01-03-2019	Efluente E40%	5.90	5.17	21.9	32.97
Semana 20	Eficiencia E20%	79.40%	74.30%	25.43%	58.86%
	Eficiencia E40%	85.27%	77.01%	37.43%	66.20%

Fuente: *Elaboración propia*

Con el fin de determinar el Nitrógeno total (N-t), en la Tabla 5.14, se pueden apreciar los resultados de las mediciones de nitritos (como NO₂⁻-N mg/L), nitratos (como NO₃⁻- N mg/L) y las eficiencias de remoción respectivas alcanzadas en cada etapa.

Los valores de los nitritos fueron 0.003 y 25.4 NO_2^- -N mg/L, y los nitratos fueron 25.4 y 35 NO_3^- -N mg/L para los afluentes en la etapa N°01 y N°02 respectivamente; excepto el primer valor, los demás no son característicos de las aguas residuales domésticas donde para estos parámetros se esperan concentraciones menores a 1 mg/L, e indican que ya existen transformaciones del nitrógeno en las alcantarillas o el pretratamiento. Sin embargo, el valor del nitrógeno total (en la forma N) fue 70.04 y 97.54 mg/L para los afluentes en la etapa N°01 y N°02, y se ubica dentro del rango esperado de 30 a 100 mg/L (Romero, 2004).

Los valores de nitritos fueron 0.036, 0.685, 5.78 y 5.17 NO_2^- -N mg/L; y de nitratos fueron 4.30, 5.70, 26.10 y 21.90 NO_3^- -N mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente en ambos casos. Las concentraciones de N-total fueron 35.92, 32.62, 40.13 y 32.97 N mg/L, y las eficiencias de remoción alcanzadas fueron 48.72%, 53.44%, 58.86% y 66.20% para los efluentes 5%, 10%, 20% y 40% respectivamente en ambos casos.

Para realizar una mejor comparación de los resultados de las mediciones del NTK se incluyeron las condiciones operativas de los MBBRs, como los caudales aplicados, volúmenes de los reactores y la cantidad de portadores, y otros factores determinantes en las conversiones del nitrógeno. Considerando esto, en la Tabla 5.15 y el Gráfico 5.18, se presentan las cargas superficiales de NTK aplicadas a los reactores en términos de $\text{gNTK}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ y las eficiencias alcanzadas.

Aquí se aprecia que los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40%, bajo cargas superficiales de NTK aplicadas de 8.61, 4.30, 1.93 y 0.96 $\text{gNH}_3^+\text{-N}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ alcanzaron eficiencias de remoción de 29.26%, 41.24%, 79.40% y 85.27% respectivamente. Se observa una tendencia inversa entre las cargas aplicadas y las remociones (Ver Gráfico 5.18). Esto podría indicar que, además de las mejores condiciones de O.D. (mayores a 7.0 mg/L) y temperatura para los reactores R20% y R40%, la cantidad de lechos móviles para la biopelícula favoreció las conversiones.

Estos valores fueron obtenidos bajo condiciones favorables de oxígeno disuelto (mayores a 3.0 mg/L), temperatura, pH (entre 7.2 y 9.0) y relaciones $\text{DBO}_5/\text{NTK} < 5$ para la nitrificación. Otras investigaciones obtuvieron rangos de remoción similares; Luostarinen et al. (2006) obtuvieron eficiencias de remoción medias de $57\% \pm 11\%$ con cargas de 5 $\text{gN-t/m}^2\text{-d}$; y Minegatti (2008) logro eficiencias de 42% bajo cargas de 1.05 $\text{grNH}_3^+ \text{- N/m}^2\text{-d}$.

Tabla 5.15. Resultados de la remoción de carga superficial de NTK aplicada a los reactores y factores determinantes

MBBR	Carga de NTK aplicada ($\text{gNTK/m}^2\text{-d}$)	Eficiencia de remoción	O.D. (mg/L)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Relación DBO_5/NTK	pH
R5%	8.61	29.26%	3.83	20.60	3.49	8.5
R10%	4.30	41.24%	4.34	20.20	3.49	8.4
R20%	1.93	79.40%	7.46	28.20	3.75	7.7
R40%	0.96	85.27%	7.74	27.80	3.75	7.5

Fuente: Elaboración propia

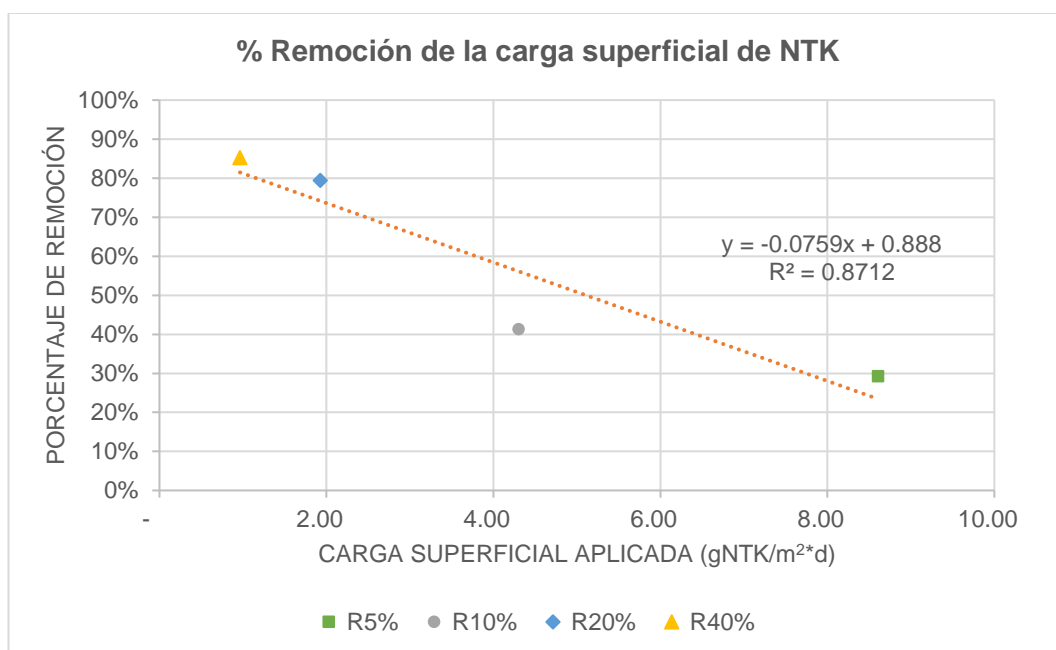


Gráfico 5.18. Variación del porcentaje de la remoción de Carga superficial aplicada en los MBBRs (en terminos del NTK)

5.12 MEDICIONES DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

En las Tablas 5.16 y 5.17 se presentan el resumen de las mediciones de Sólidos Suspendidos; para visualizar los valores semanales obtenidos ver las Gráficos del 5.19 al 5.22 y el anexo N°03. Estos resultados se complementarán con los SST en los portadores para determinar la biomasa total de los MBBRs.

Tabla 5.16. Resumen de las mediciones de Sólidos Suspendidos durante la Etapa N°01

Punto de monitoreo	Valor	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
Afluente	Promedio	57.60 ± 30.52	9.32 ± 5.80	48.28 ± 25.10
	Máximo	123.33	22.38	100.95
	Mínimo	14.25	2.13	12.12
MBBR R5%	Promedio	95.21 ± 28.60	12.66 ± 5.55	82.55 ± 24.71
	Máximo	156.50	25.00	136.50
	Mínimo	61.00	3.20	54.00
MBBR R10%	Promedio	118.08 ± 69.65	15.90 ± 11.00	102.18 ± 59.70
	Máximo	313.50	45.50	268.00
	Mínimo	55.20	-	49.60
Efluente E5%	Promedio	13.51 ± 5.35	1.00 ± 0.89	12.51 ± 5.04
	Máximo	24.29	2.71	22.57
	Mínimo	5.60	-	4.90
Efluente E10%	Eficiencia (%)	69.12 ± 22.24	84.36 ± 27.74	66.44 ± 22.24
	Promedio	11.94 ± 3.69	0.72 ± 0.71	11.22 ± 3.80
	Máximo	18.00	2.17	18.00
Efluente E10%	Mínimo	6.80	-	6.10
	Eficiencia (%)	70.21 ± 25.37	85.43 ± 27.13	67.49 ± 25.98

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.17. Resumen de las mediciones de Sólidos Suspendidos durante la Etapa N°02

Punto de monitoreo	Valor	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
Afluente	Promedio	66.67 ± 29.40	10.06 ± 5.53	56.60 ± 24.93
	Máximo	122.45	23.50	106.94
	Mínimo	35.00	3.33	27.80
MBBR R20%	Promedio	120.99 ± 19.00	12.89 ± 5.54	108.10 ± 16.10
	Máximo	152.00	21.33	130.67
	Mínimo	91.33	5.00	81.33
MBBR R40%	Promedio	116.07 ± 37.33	13.46 ± 6.63	102.61 ± 32.35
	Máximo	200.50	26.21	176.00
	Mínimo	67.50	6.80	59.00
Efluente E20%	Promedio	32.84 ± 35.18	2.84 ± 4.57	30.00 ± 31.14
	Máximo	109.50	15.50	94.00
	Mínimo	1.00	-	1.00
	Eficiencia (%)	48.99 ± 52.64	75.79 ± 28.94	44.09 ± 57.51
Efluente E40%	Promedio	23.65 ± 23.70	1.80 ± 2.61	21.86 ± 21.39
	Máximo	83.00	9.50	73.50
	Mínimo	1.40	-	1.40
	Eficiencia (%)	62.72 ± 34.82	84.40 ± 19.18	58.62 ± 38.47

Fuente: Elaboración propia

En las dos tablas anteriores, se puede apreciar que los valores promedios de SST en los afluentes fueron de 57.60 ± 30.52 y 66.67 ± 29.40 mg/L en la etapa N°01 y N°02 respectivamente; aunque el valor promedio durante la última etapa fue mayor, las concentraciones de SST se mantuvieron dentro de un rango similar y característico para las aguas residuales domésticas débiles y medias (Metcalf & Eddy, 1995). Se aprecia también en los afluentes que los valores promedios de SSV fueron 9.32 ± 5.80 y 10.06 ± 5.53 mg/L en la etapa N°01 y N°02 respectivamente, y para los SSF fueron 48.28 ± 25.10 y 56.60 ± 24.93 mg/L representando el 83 a 85% del total de los SST, indicativo del predominio de los compuestos inorgánicos en los SS de los afluentes. (Ver también Gráfico 5.19).

De las Tablas 5.16 y 5.17, se observa también que los registros promedios de SST en los MBBRs fueron 95.21 ± 28.60 , 118.08 ± 69.65 , 120.99 ± 19.00 y 116.07 ± 37.33 mg/L para R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente; estos valores son similares entre sí, indicativo que la concentración de este parámetro en los reactores fue siempre baja, del orden del 5% de las concentraciones de SST en reactores de lodos activados convencionales (1500 a 3000 mg/L). Se aprecia también que los valores promedios de SSV fueron 12.66 ± 5.55 , 15.90 ± 11.00 , 12.89 ± 5.54 y 13.46 ± 6.63 mg/L para los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente, y para los SSF fueron 30.00 ± 31.14 , 102.18 ± 59.70 , 108.10 ± 16.10 y 102.61 ± 32.35 mg/L representando entre el 86 al 90% de los SST, indicativo del predominio de los compuestos inorgánicos en los SS de los MBBRs.

En procesos MBBRs es común que la biomasa se encuentre principalmente en los sólidos adheridos a los portadores. Durante la investigación, las bajas concentraciones de SST en los MBBRs (ver Gráficos 5.21 y 5.22) se podrían explicar debido a la ausencia de la recirculación de lodos, lo que impidió modificar el tiempo de retención celular.

De las Tablas 5.16 y 5.17, se observa que los registros promedios de SST en los efluentes fueron 13.51 ± 5.35 , 11.94 ± 3.69 , 32.84 ± 35.18 y 23.65 ± 23.70 mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente. En la etapa N°01, los valores promedios fueron cercanos y con mayor estabilidad respecto de la etapa N°02, donde se obtuvieron concentraciones promedias mayores y de gran variabilidad. Se aprecia también que los valores promedios de SSV fueron 1.00 ± 0.89 , 0.72 ± 0.71 , 2.84 ± 4.57 y 1.80 ± 2.61 mg/L para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente, y para los SSF fueron 12.51 ± 5.04 , 11.22 ± 3.80 , 30.00 ± 31.14 y 21.86 ± 21.39 mg/L representando entre 91 a 93% de los SST, indicativo del predominio de los compuestos inorgánicos en los SS de los efluentes.

Adicionalmente de las Tablas 5.16 y 5.17, se aprecia que los mayores porcentajes de remoción promedio de SST fueron logrados durante la etapa N°01, con $69.12 \pm 22.24\%$ y $70.21 \pm 25.37\%$ para los efluentes E5% y E10%; y en la Etapa N°02, los porcentajes disminuyeron a $48.99 \pm 52.64\%$ y $62.72 \pm 34.82\%$ para los efluentes E20% y E40%. Para los SSV, los porcentajes de remoción promedio fueron de $84.36 \pm 27.74 \%$, $85.43 \pm 27.13 \%$, $75.79 \pm 28.94 \%$ y $84.40 \pm 19.18\%$ para los efluentes E5%, E10%, E20% y E40% respectivamente.

En general, para efluentes de reactores de lodos activados los SST en los efluentes varían entre 6 a 30 mg/L (Metcalf & Eddy, 1995). Experimentos en MBBRs, aseguraron buena separación de sólidos con valores de SST efluentes dentro de ese rango (Ødegaard, 1994; Minegatti, 2008). Para lograr estas concentraciones de SST, es importante una buena condición operativa de los sedimentadores secundarios, que garantice la separación de sólidos y el espesamiento y almacenamiento temporal de los lodos.

En el Gráfico 5.20, se aprecia un comportamiento estable de los SST en los efluentes E5% y E10% durante toda la etapa N°01, con concentraciones que se mantuvieron dentro del rango adecuado siempre. Para la etapa N°02, se observa un comportamiento variable de los SST en los efluentes E20% y E40%; durante esta etapa, además del incremento de la temperatura, se presentaron problemas operativos como el bulking y el fango ascendente, los cuales se solucionaron recalibrando la aireación en los MBBRs y aumentando la extracción de lodos acumulados en los sedimentadores. En las tres semanas finales de la etapa N°02, se logró estabilizar el parámetro dentro del rango adecuado y se lograron eficiencias de remoción de SST superiores al 84%.

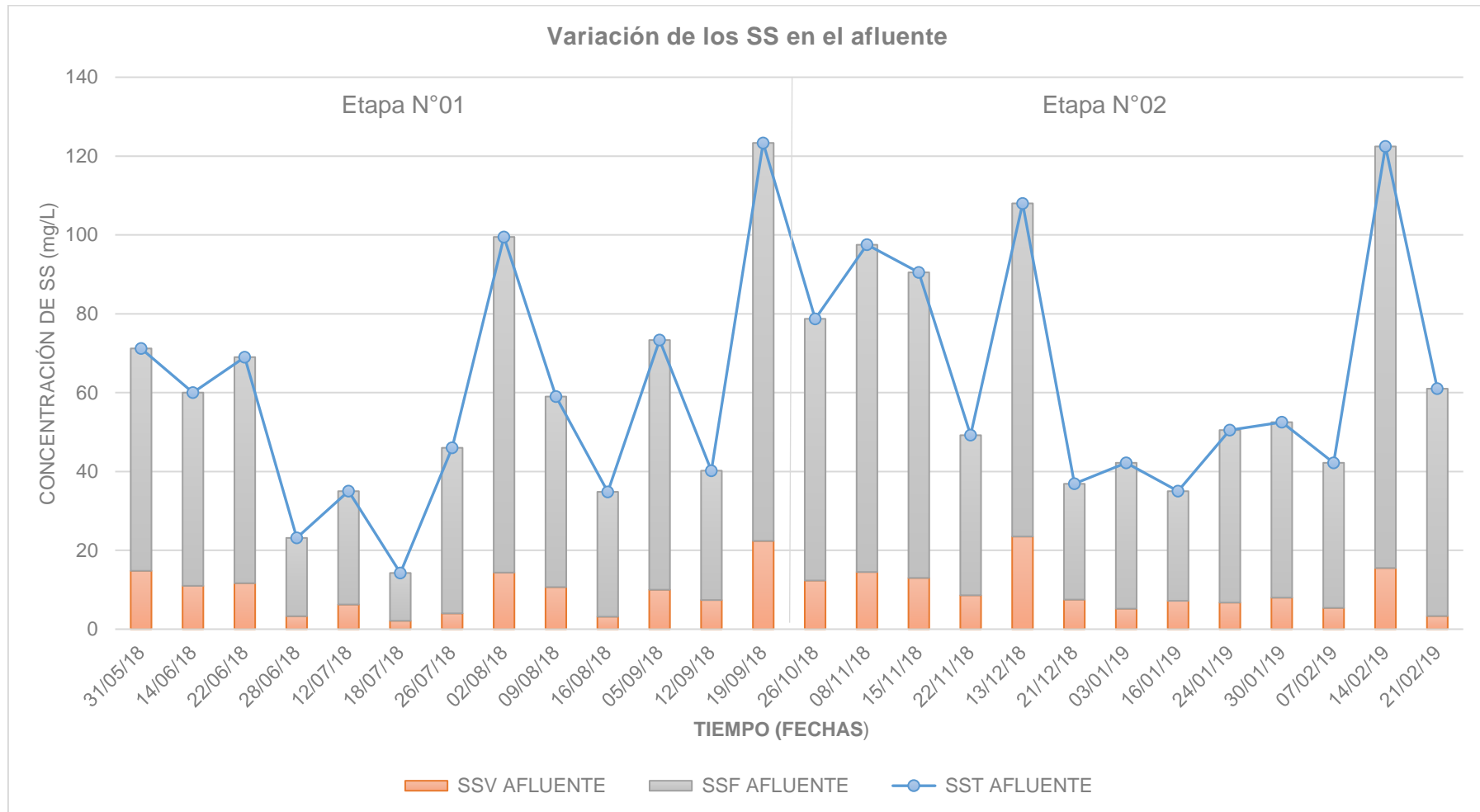


Gráfico 5.19. Variación de los SS en el afluente durante las Etapas N°01 y N°02

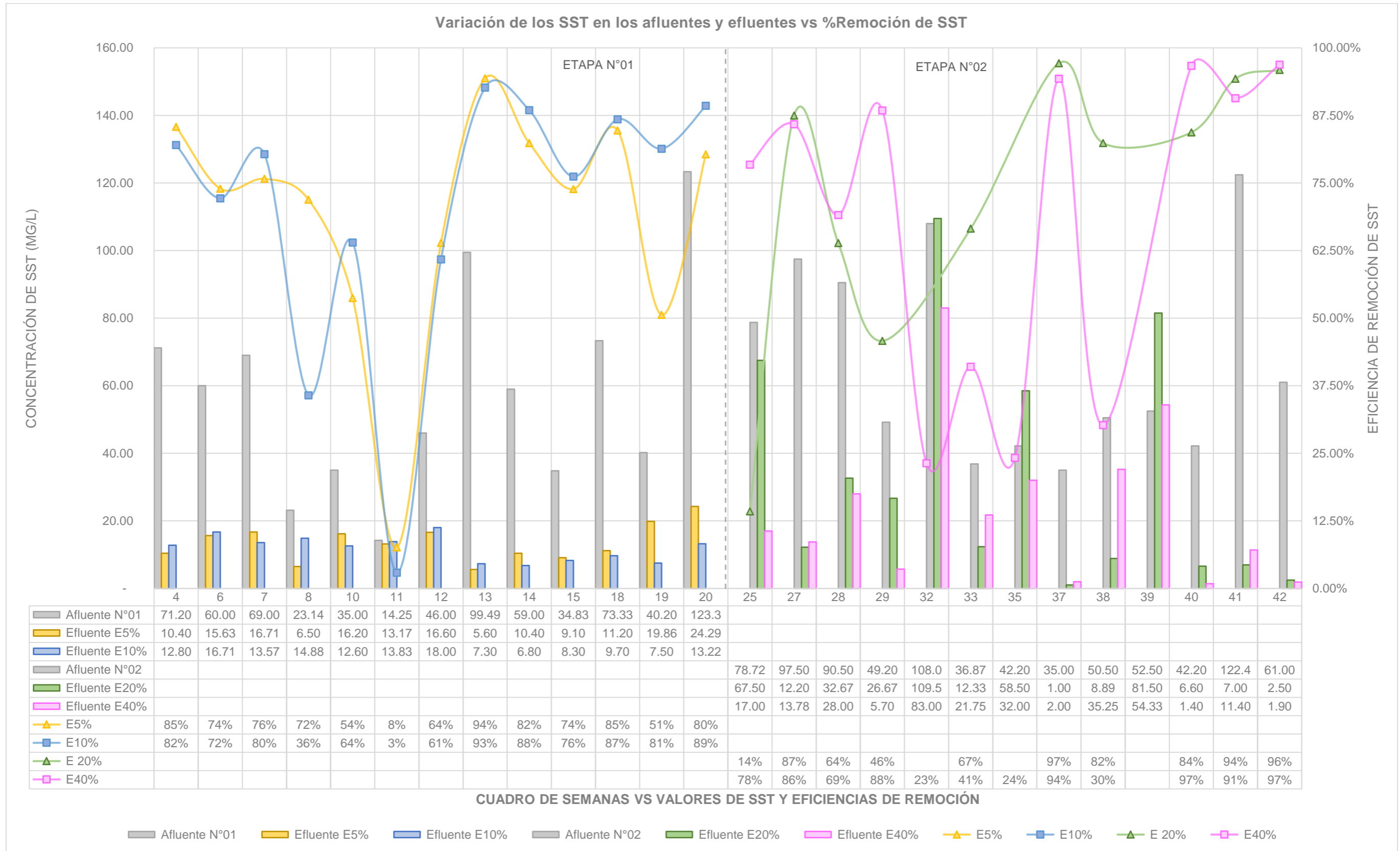


Gráfico 5.20. Variación de los SST en los afluentes y efluentes versus Eficiencias de remoción de SST alcanzadas en las Etapas N°01 y N°02

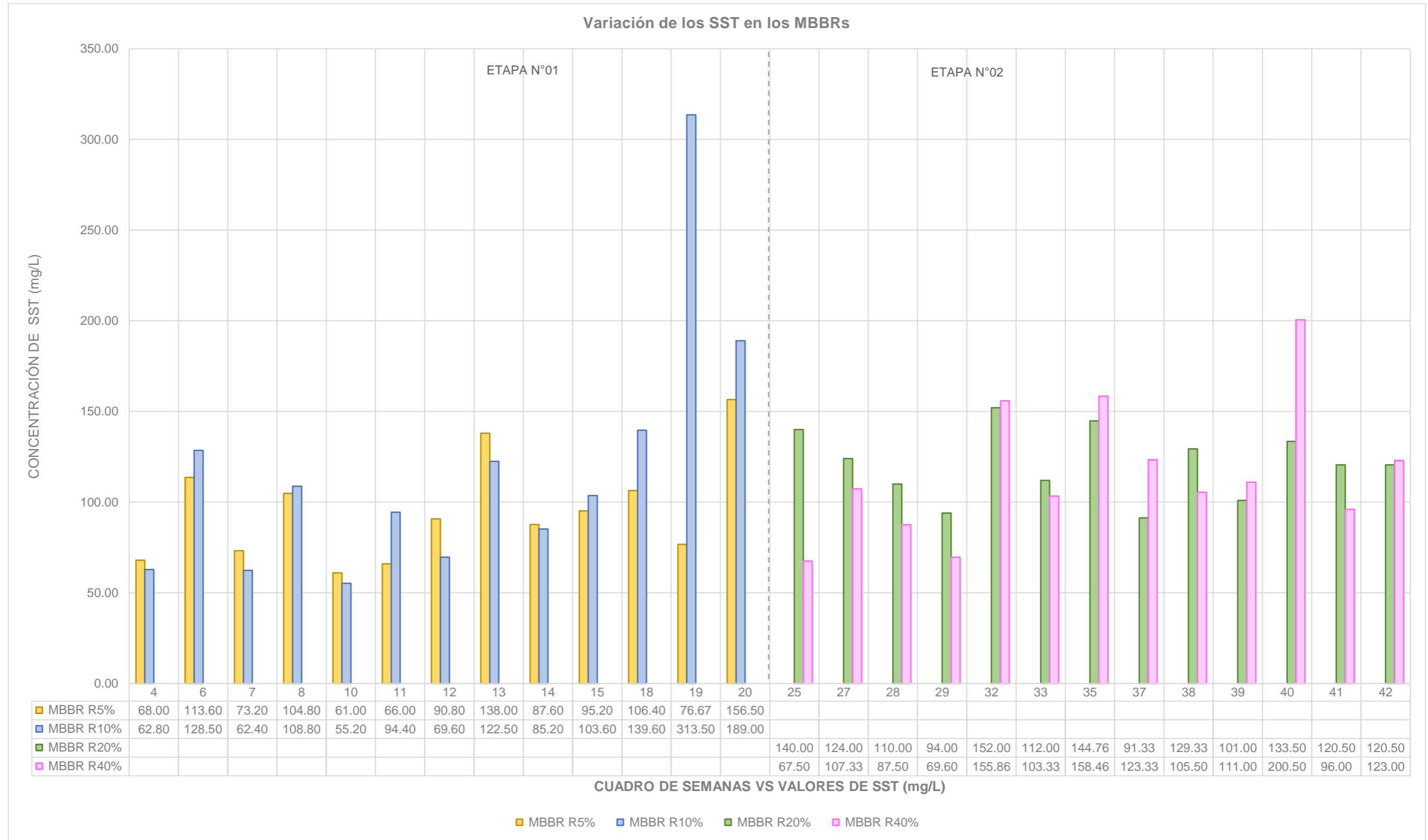


Gráfico 5.21. Variación de los SST en los MBBRs durante las Etapas N°01 y N°02

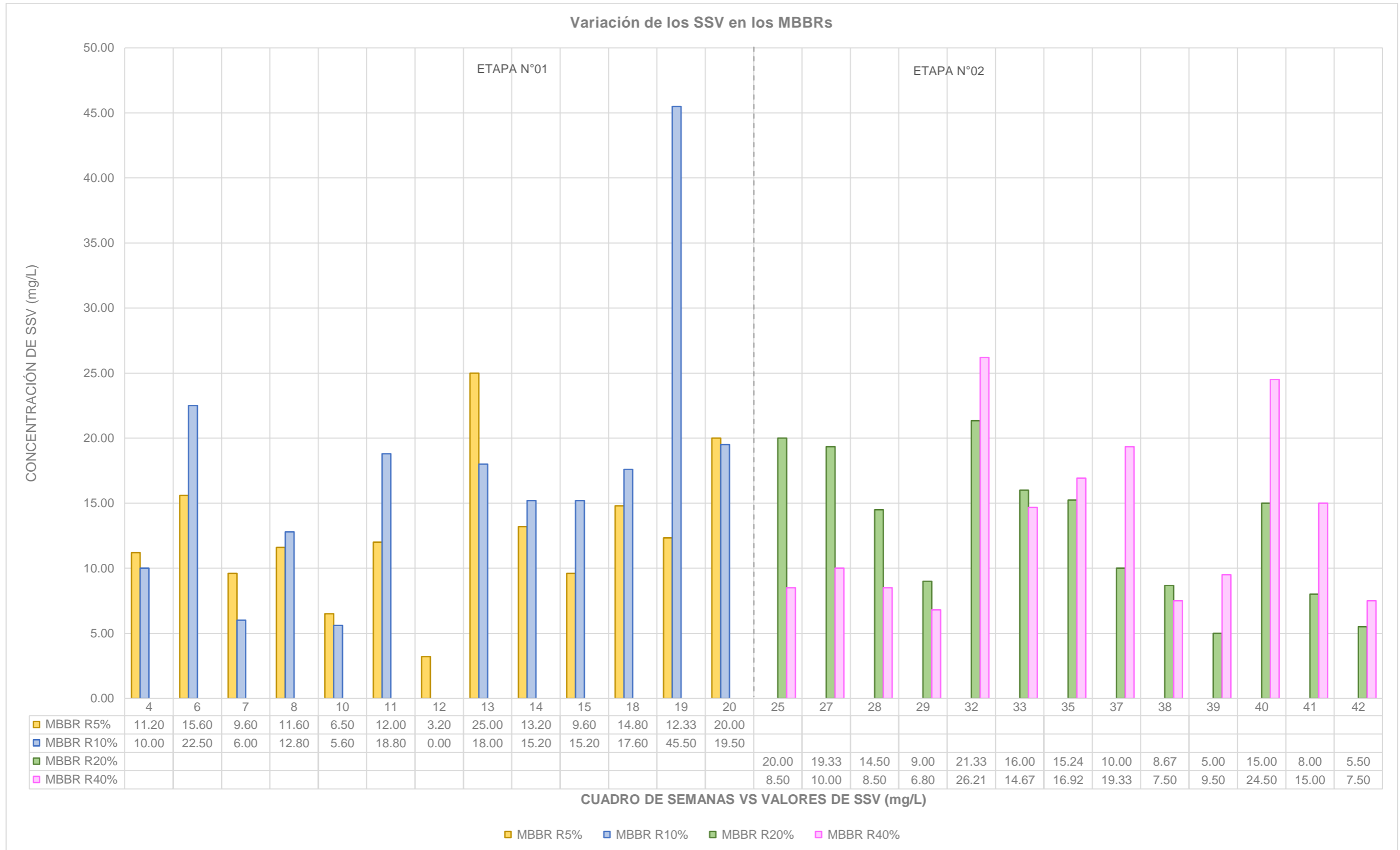


Gráfico 5.22. Variación de los SSV en los MBBRs durante las Etapas N°01 y N°02

5.13 MEDICIONES DE LOS SÓLIDOS ADHERIDOS A LOS LECHOS MÓVILES

En la Tabla 5.18 se presenta el resumen de las mediciones de sólidos adheridos realizadas a los lechos móviles. Para visualizar todos los valores obtenidos ver el anexo N°04.

Tabla 5.18. Resultados de las mediciones de los Sólidos suspendidos adheridos a los lechos móviles (portadores de la biopelícula) utilizados en la investigación

Parámetro	MBBRs			
	R5%	R10%	R20%	R40%
COS (gDQO/m ² .d)	50.15	25.07	17.43	8.71
Promedio	0,209 ±	0.232 ±	0.048 ±	0.057 ±
gSST/ portador	0,046	0.029	0.010	0.029
Máximo	0,270	0.274	0.065	0.104
Mínimo	0,126	0.163	0.030	0.022
FBA* (gSST/m ²)	26.66	29.55	6.11	7.28
SST adheridos (mg/L)	355.50	787.88	326.62	777.86
Promedio	0.101 ±	0.107 ±	0.019 ±	0.036 ±
gSSV/ portador	0.029	0.014	0.005	0.024
Máximo	0.131	0.127	0.028	0.072
Mínimo	0.044	0.081	0.010	0.009
FBA (gSSV/m ²)	12.84	13.63	2.38	4.60
SSV adheridos (mg/L)	171.25	363.56	127.29	490.81
Promedio	0.108 ±	0.125 ±	0.029 ±	0.021 ±
gSSF/ portador	0.019	0.020	0.006	0.006
Máximo	0.139	0.152	0.037	0.032
Mínimo	0.082	0.081	0.018	0.006
FBA (gSSF/m ²)	13.82	15.91	3.73	2.69
SSF adheridos (mg/L)	184.26	424.32	199.34	287.04

FBA*: Formación de biomasa adherida promedio. Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 5.18 se puede apreciar que los valores promedios de sólidos adheridos a los lechos móviles, como SST, fueron: $0,209 \pm 0,046$, 0.232 ± 0.029 , 0.048 ± 0.010 y 0.057 ± 0.029 gSST/portador; como SSV fueron: 0.101 ± 0.029 , 0.125 ± 0.020 , 0.019 ± 0.005 y 0.036 ± 0.024 gSSV/portador; y como SSF fueron: 0.108 ± 0.019 , 0.125 ± 0.020 , 0.029 ± 0.006 y 0.021 ± 0.006 gSSF/portador en los lechos móviles de los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente en cada caso.

De la tabla 5.18 y el Gráfico 5.23, se observa que las tasas de FBA, como SST, fueron 26.66, 29.55, 6.11 y 7.28 gSST/m²; y como SSV fueron 12.84, 13.63, 2.38 y 4.60 gSSV/m² en los portadores de los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente en cada caso. Otras investigaciones señalan diferentes valores de FBA: 5 gSSV/m² (Hong-Bin et al., 1994), 4 gSST/m² bajo COS de 9.3 gDQO/m².d (Andreottola et al., 2003), 23.8 gSST/m² y 15 gSSV/m² bajo 19.08 gDQO/m².d (Minegatti, 2008).

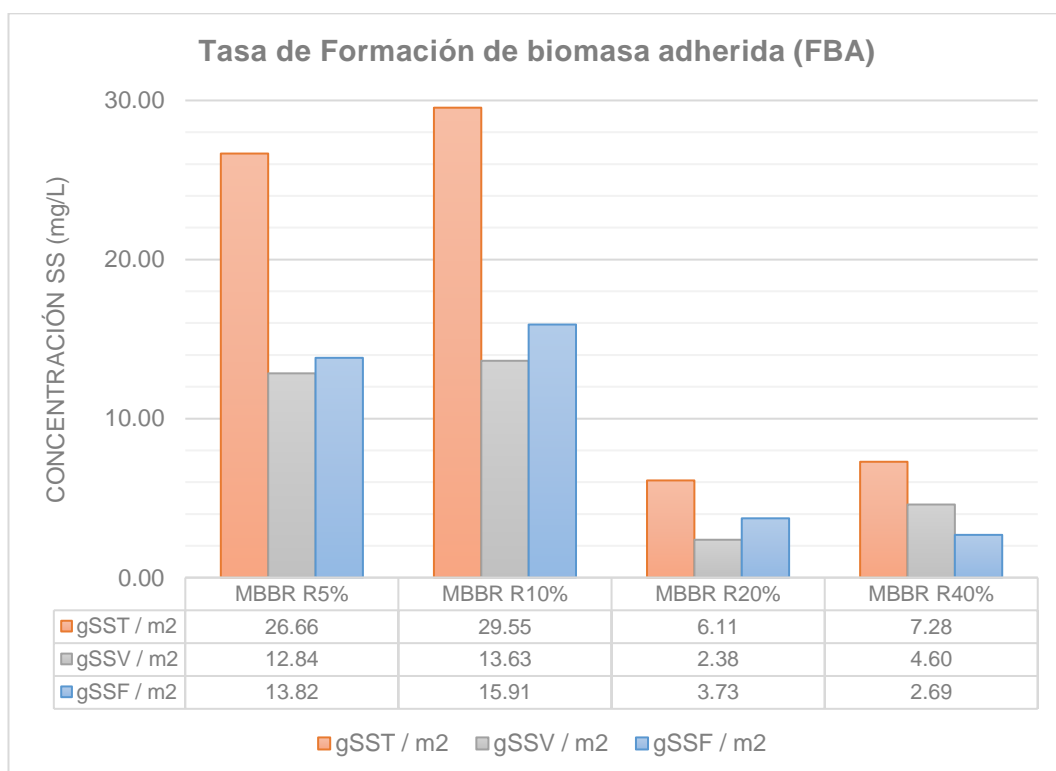


Gráfico 5.23. Comparación de la Tasa de Formación de Biomasa Adherida a los lechos móviles (FBA) en cada MBBR

En el Gráfico 5.24, se observa que la FBA estuvo influenciada por la cantidad de lechos móviles usados en cada MBBR, y en consecuencia guardo relación con las COS aplicadas. Se alcanzaron valores notablemente mayores de FBA, entre 3 a 4 veces mayor, en los lechos móviles de los MBBRs R5% y R10% los cuales estuvieron bajo mayores COS. La línea de tendencia indica que aumentar la COS encima de 40 gDQO/m².d ya no incrementaría el valor de FBA máximo de 30 gSST/m² y por el contrario este valor empezó a descender.

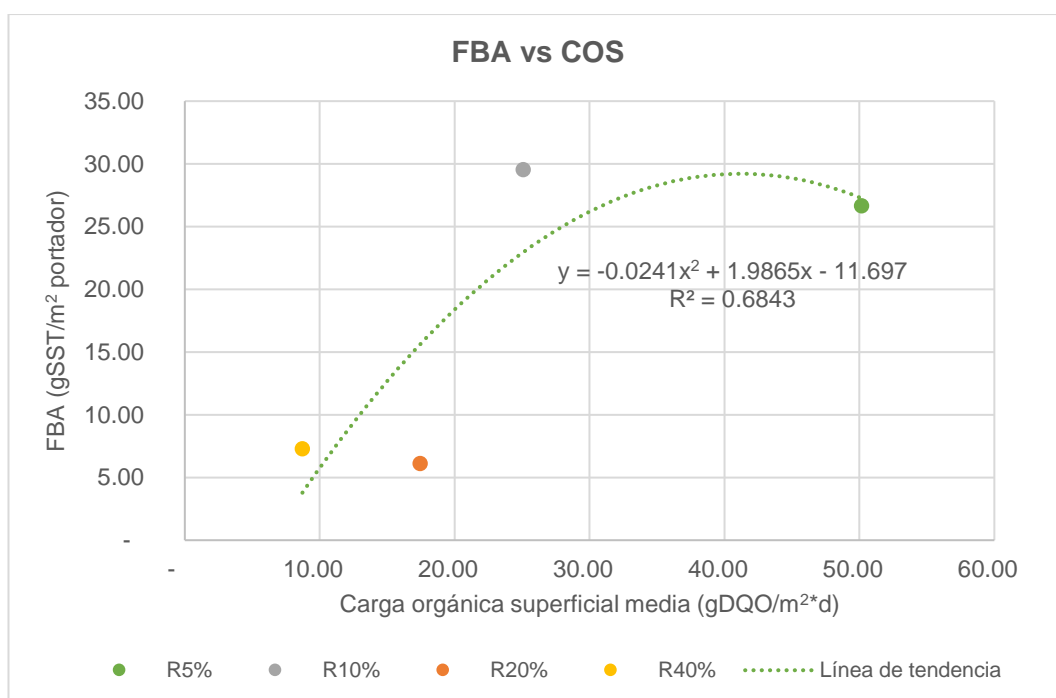


Gráfico 5.24. Comparación de la Tasa de FBA a los lechos móviles y la COS en términos de la DQO aplicada a los reactores

Se determinó la concentración promedio equivalente, en términos de SS, de toda la biomasa adherida en los lechos móviles dividiéndola entre el volumen de los MBBRs. En el Gráfico 5.25 se aprecia que los SST adheridos fueron 355.50, 787.88, 326.62 y 777.86 mg/L; y los SSV adheridos fueron 171.25, 363.56, 127.29 y 490.81 mg/L en los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente en cada caso. Los SSV representaron en promedio el 48.17%, 46.12%, 39.58% y 63.16% del total

de los SST adheridos, indicativo del carácter mixto entre componentes inorgánicos y orgánicos de la biopelícula.

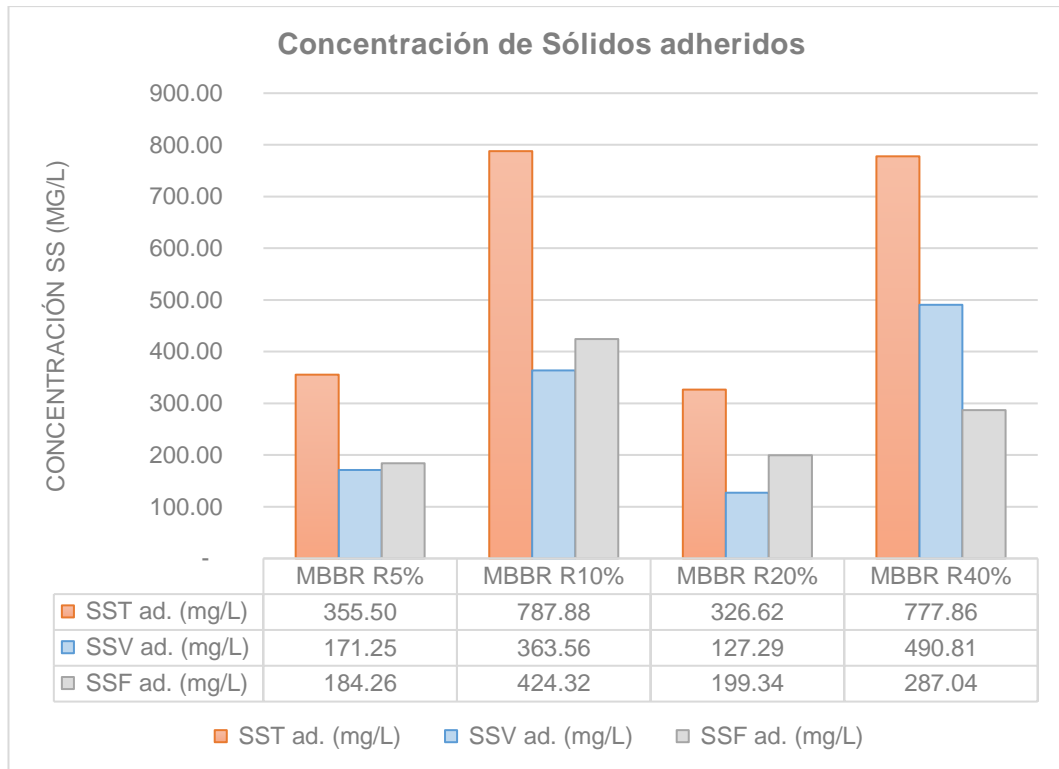


Gráfico 5.25. Concentración promedio de Sólidos adheridos (a los portadores) en los MBBRs

Finalmente, de la Fotografía 5.1, se pudo notar la clara diferencia entre las cantidades de biomasa adherida desarrollada hasta el final de las Etapas N°01 y N°02. Debido a que los MBBRs R20% y R40% contuvieron 572 y 1144 lechos móviles (portadores), el área disponible y la cantidad de colisiones entre los lechos fue mucho mayor que en los MBBRs R5% y R10%, que contuvieron 143 y 286 lechos móviles, lo que pudo también influenciar en los resultados. En todos los lechos móviles se aprecia una adherencia mayor en las partes internas y entre las corrugaciones externas.



Fotografía 5.1. Imágenes de los lechos móviles al final de la Etapa N°01 (Izquierda: R5% y R10%) y Etapa N°02 (Derecha: R20% y R40%)

5.14 DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA TOTAL EN LOS MBBRs

Se presenta en la Tabla 5.19 y el Gráfico 5.26 las concentraciones de la biomasa global promedio (como SS) en los MBBRs, calculada sumando los resultados en los ítems 5.12 y 5.13.

Tabla 5.19. Biomasa total promedio (como SS) en los MBBRs

Parámetro	MBBR	MBBR	MBBR	MBBR
	R5%	R10%	R20%	R40%
SST –*Global (mg/L)	450.71	905.96	447.62	893.93
%SST – Adheridos	78.88%	86.97%	72.97%	87.02%
%SST- Suspensión	21.12%	13.03%	27.03%	12.98%
SSV - Global (mg/L)	183.91	379.46	140.18	504.27
SSF - Global (mg/L)	266.81	526.50	307.44	389.65
SSV / SST	40.81%	41.89%	31.32%	56.41%
SSF / SST	59.19%	58.11%	68.68%	43.59%

*Global: sólidos adheridos a los lechos móviles + sólidos suspendidos en el licor de mezcla. Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que la biomasa total como concentración equivalente o global fue: como SST de 450.71, 905.96, 447.62 y 893.93 mg/L; como SSV de 183.91, 379.46, 140.18 y 504.27 mg/L; y como SSF de 266.81, 526.50, 307.44 y 389.65 mg/L, para los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente en cada caso. La biomasa adherida, como SST,

represento el 78.88%, 86.97%, 72.97% y 87.02% de la biomasa total en los MBBRs R5%, R10%, R20% y R40% respectivamente, indicativo de su carácter predominante sobre la biomasa en suspensión. La relación de las concentraciones globales de SSV/SST fue 40.81%, 41.89%, 31.32% y 56.41%, lo que indica un carácter mixto de la biomasa con un predominio de los compuestos inorgánicos, representados como concentraciones de SSF, en los MBBRs R5%, R10% y R20%; y solo en el MBBR R40% hubo un ligero predominio de los compuestos orgánicos, como SSV, en la biomasa total.

En general, se alcanzaron concentraciones globales promedio bajas de SS en todos los MBBRs, entre 450 a 900 mg/L (ver Gráfico 5.26), y representaron solo el 30% de las concentraciones de SST en reactores de lodos activados convencionales (1500 a 3000 mg/L). (Metcalf & Eddy, 1995; Romero, 2004).

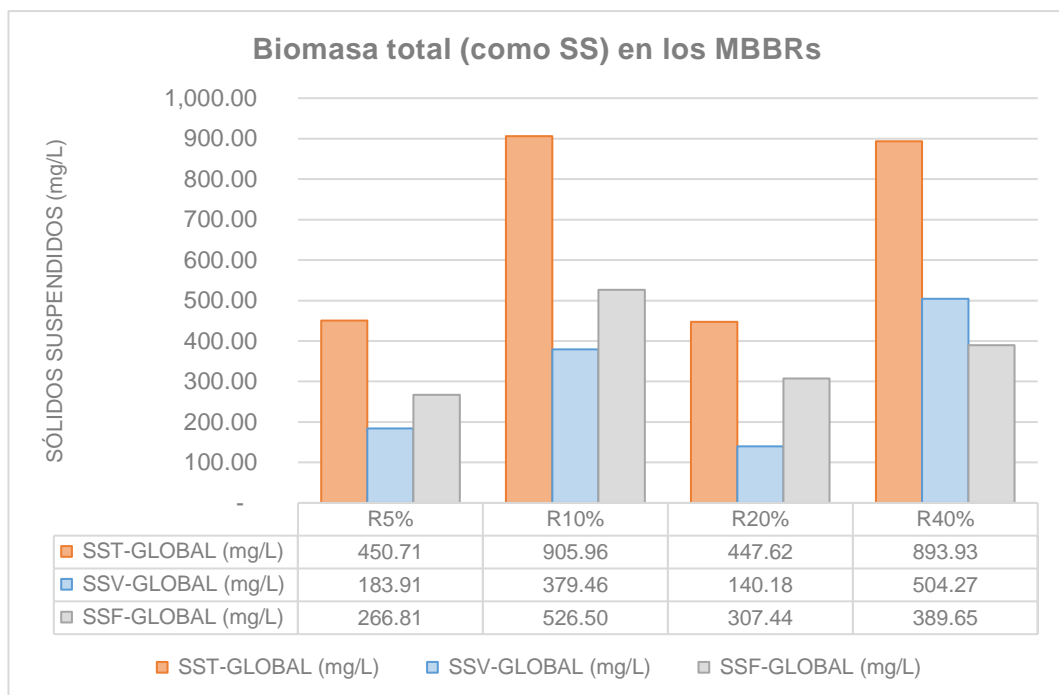


Gráfico 5.26. Concentración promedio de la Biomasa total (como Sólidos Suspendedidos) en los MBBRs

Se observa también que las concentraciones globales de SST entre los reactores R5% con R10%, y entre R20% con R40% mantuvieron una relación de 1 a 2, similar a la relación del área superficial disponible para la biopelícula. Esto se podría explicar porque las condiciones operacionales y ambientales para el crecimiento y desarrollo de la biopelícula en cada reactor dentro de la misma etapa fueron muy similares, y que la diferencia estuvo precisamente en la cantidad de portadores.

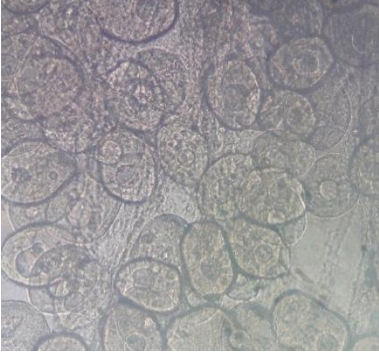
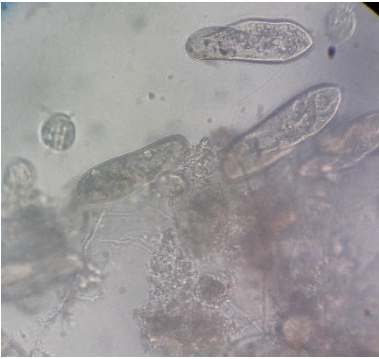

Las concentraciones de SST entre los reactores R5% y R20%, así como entre los reactores R10% y R40% fueron muy similares. Esto se podría deber a que las cargas orgánicas volumétricas (sustrato) entre etapas fueron también similares. Otras investigaciones en MBBRs también señalaron la influencia de las condiciones operativas en las características de la biopelícula (como densidad, forma, crecimiento). (Nicolella et al., 2000).

5.15 OBSERVACIONES EN EL MICROSCOPIO

En la tabla 5.20 se presentan las imágenes y descripciones estimadas de los principales microorganismos encontrados en las observaciones realizadas en el microscopio. Las fotografías obtenidas fueron comparadas con las publicaciones de Isac et al. (1994), Izquierdo (2006) y Moeller & Tomasini (2010).

De forma general, se apreció que en todos los reactores se encontraron comunidades mixtas de microorganismos posiblemente conformadas por rotíferos, ciliados fijos o adheridos, ciliados libres (nadadores o reptantes), anélidos y nematodos, todos característicos de los procesos aerobios.

Tabla 5.20. Imágenes y descripciones estimadas de los principales microorganismos encontrados en los MBBRs (biopelícula y floc)

Imagen	Descripción estimada
	<p>Possible Reino: Protista (Protozoarios coloniales)</p> <p>Possible Filo: Ciliados (fijos o adheridos)</p> <p>Predominancia alta</p> <p>Se encontraron formando amplias colonias fijadas a sustratos mediante pedúnculos. Su presencia fue un indicador de buen funcionamiento.</p>
	<p>Possible Reino: Protista (Protozoarios)</p> <p>Possible Filo: Ciliados (libres o nadadores)</p> <p>Predominancia media</p> <p>De forma ovalada o de suela muy característica. Vive en aguas ricas en nutrientes y se alimentan de bacterias y otros microorganismos.</p>
	<p>Possible reino: Protista (Protozoarios)</p> <p>Possible filo: Ciliados (reptantes y nadadores)</p> <p>Predominancia media</p> <p>Presenta cirros o pestañas y estructura celular ovoide muy característica. Se mueven sobre las superficies de los flócs y se alimentan de bacterias, es común en los procesos aerobios.</p>



Posible reino: Protista (Protozoarios)

Posible filo: Ciliados (reptantes y nadadores)

Predominancia media

De forma ovalada y aplanado, se alimenta de bacterias. Su presencia fue un indicador de lodos estabilizados y buen funcionamiento.



Posible filo: Rotífero

Predominancia alta (mayormente biopelícula)

Se alimenta de bacterias y partículas pequeñas de materia orgánica. Posee dos series de cilios rotatorios sobre la cabeza que utiliza para moverse y atrapar sus alimentos.



Posible filo: Rotífero

Predominancia alta (mayormente biopelícula)

Microorganismo detritívoro. Su abundante presencia fue un indicador de elevada edad del lodo y buena eficiencia de remoción de materia orgánica.



Posible filo: Nemátodo

Predominancia baja (principalmente en la biopelícula).

De forma alargada y plana. Depredador de bacterias y protozoarios. Su presencia indica una elevada edad de lodos.



Posible filo: Anélida

Posible especie: Aeolosoma sp

Predominancia baja (principalmente en la biopelícula)

Gusano anélido transparente con quetas dorsales y salpicaduras rojizas o anaranjadas muy características. Su presencia indica una elevada edad de lodos y buenos rendimientos en el tratamiento.

Fuente: Elaboración propia

Los microorganismos observados en la biopelícula de los lechos móviles y los flocs en el licor de mezcla fueron similares para todos los MBBRs. Para tener una descripción más exacta de los microorganismos se requieren análisis más especializados.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

- Los MBBRs estudiados presentaron un buen desempeño en la remoción de la DBO_5 , con eficiencias promedios de remoción de este parámetro entre el 84% y el 88% bajo cargas orgánicas superficiales promedios entre 3.85 y 25.59 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$, valores incluidos dentro de lo planteado en la hipótesis y que superan las cargas de diseño normalmente usadas en MBBRs de 15 $\text{gDBO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- Los MBBRs estudiados presentaron un desempeño aceptable en la remoción de la DQO, con eficiencias promedios de remoción de este parámetro entre el 68% y el 77% bajo cargas orgánicas superficiales promedios entre 8.71 y 50.15 $\text{gDQO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$.
- Cuando se trabajó los MBBRs bajo cargas orgánicas superficiales inferiores a 20 $\text{gDQO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, como fue el caso para los MBBRs con porcentajes de llenado con lechos móviles de 20% y 40%, estos alcanzaron eficiencias de remoción de la DQO superiores al 85%.
- Los MBBRs estudiados, bajo cargas superficiales de N-t de 13.51, 6.75, 4.69 y 2.35 $\text{gN-t}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, lograron eficiencias de remoción de 48.72%, 53.44%, 58.86% y 66.20% respectivamente, indicador de una relación inversa entre las eficiencias de remoción de los compuestos nitrogenados y las cargas superficiales de los mismos aplicadas a los MBBRs.
- En los MBBRs estudiados, la biomasa total estuvo predominantemente conformada por la biomasa adherida a los lechos móviles, representando el 78.88%, 86.97%, 72.97% y 87.02% del total, en los MBBRs con porcentajes de llenados con lechos móviles de 5%, 10%, 20% y 40% respectivamente.
- El lecho móvil seleccionado como portador de la biopelícula en los MBBRs estudiados, con una superficie específica total de 267 m^2/m^3 , tuvo una gran capacidad de adherencia y desarrollo de la biopelícula, alcanzando una tasa de "Formación de Biomasa adherida" de 29.55 gSST/m^2 y 13.63 gSSV/m^2 en los lechos móviles del MBBR con un porcentaje de llenado de estos del 10%.
- La tasa de "Formación de Biomasa adherida" (FBA) fue influenciada por la cantidad de lechos móviles usados en cada MBBR, y en consecuencia guardo relación con las cargas orgánicas superficiales aplicadas. Aumentar las cargas orgánicas superficiales encima de 40 $\text{gDQO}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ya no incremento el valor de

de la tasa FBA máximo para los portadores usados de 29.55 gSST/m² y por el contrario este valor empezó a descender.

- Las turbiedades promedio alcanzadas en los MBBRs fueron bajas, en el rango de 60 a 100 UNT, indicativo del predominio de bajas concentraciones de SS en el licor de mezcla de los MBBRs sin recirculación. Para los efluentes, las turbiedades promedio quedaron en el rango de 8.5 a 12.5 UNT, y alcanzaron eficiencias de remoción promedio entre 91% a 93%, indicadores de los buenos desempeños de los MBBRs en la remoción de este parámetro.
- Los valores del pH en los MBBRs estudiados quedaron en rangos adecuados para el desarrollo de los procesos biológicos incluyendo la nitrificación (7.2-9.0). Las variaciones de este parámetro no fueron significativas o perjudiciales para el tratamiento.
- Los valores de la temperatura en los MBBRs se mantuvieron en un rango adecuado para los procesos biológicos, siendo más favorables para los MBBRs de la Etapa N°02.
- Los valores de O.D. promedio en los MBBRs estudiados quedaron en el rango de 5.77 ± 1.32 y 6.80 ± 0.96 mg/L, valores mayores a los trabajados en los procesos de lodos activados convencionales, debido a que la tecnología incluyó los procesos de biopelícula que requieren mayor energía para la mezcla del agua, los sólidos suspendidos y los lechos móviles.
- Los comportamientos similares del O.D. en los reactores indicaron que trabajaron bajo las mismas condiciones de aireación y mezcla.
- Las calibraciones y controles en el dispositivo regulador permitieron mantener caudales relativamente constantes a lo largo de un día de operación.
- Los ensayos de trazadores realizados indicaron la predominancia del flujo mezclado en los MBBRs. Así mismo, los tiempos medios de residencia representaron alrededor del 60% de lo teórico, lo que indica la presencia de cortocircuitos hidráulicos característicos de los reactores de mezcla completa.
- A pesar de las buenas eficiencias logradas en la investigación, la calidad promedio de DBO₅ y DQO en los efluentes de los MBBRs, no cumplen lo exigido en los ECAs (DS N°004-2017 MINAM -ECA Agua Sub Categoría 3).
- Los parámetros analizados en los efluentes de los MBBRs cumplen lo exigido por los LMP para efluentes de PTAR (DS N°003-2010-MINAM).

CAPITULO 7. RECOMENDACIONES

1. Para evitar la sedimentación de sólidos y la descalibración de las válvulas por obstrucciones, se recomienda instalar un pequeño mezclador de funcionamiento intermitente similar al mezclador del tanque de almacenamiento, en el dispositivo regulador de caudal
2. Acondicionar los portadores seleccionados antes de su uso en los MBBRs, sumergiéndolos en agua potable y aireándolos durante dos o tres días, para acelerar su fluidización y capacidad de sumergencia en el agua residual.
3. Instalar placas deflectoras de plástico o mallas a la salida del tanque de aireación, con la finalidad de evitar que los lechos móviles rebosen al canal recolector o que se acumulen espumas y natas y se obstruya.
4. Considerar una tubería de rebose de emergencia para el tanque de aireación.
5. Para mantener los niveles adecuados de aireación y mezcla en los MBBRs, se recomienda realizar las actividades de verificación y recalibración del sistema de aireación cada dos semanas.
6. Incrementar las cargas orgánicas volumétricas (COV) aplicadas sobre los MBBRs R20% y R40% y evaluar sus eficiencias de remoción, crecimiento de la biomasa y demás condiciones operativas.
7. Trabajar los MBBRs con tasas de recirculación controladas y evaluar el incremento de la biomasa en suspensión, biomasa adherida y la producción de lodos, así como las eficiencias de remoción alcanzadas y demás condiciones operativas.
8. Realizar más mediciones de Nitrógeno y Fósforo, para evaluar la remoción de los mismos.
9. Incorporar una o más etapas anóxicas posteriores a los reactores MBBRs para evaluar los procesos de desnitrificación.
10. Realizar una comparación de los procesos en reactores MBBRs paralelos trabajando bajo las mismas condiciones operativas de carga orgánica volumétrica (COV) y carga orgánica superficial (COS), uno con el portador seleccionado y otro con un portador patentado.
11. Complementar el sistema de tratamiento de los MBBRs con tratamientos terciarios para mejorar la calidad de los efluentes.

CAPITULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andreottola G., Foladori P., Ragazzi M., Tatano F. (2000). "Experimental comparison between MBBR and activated sludge system for the treatment of municipal wastewater". *Water Science and Technology*. Vol. 41, No.4-5, pp 375–382.
- Arden, E; Lockett, W. (1914) "Experiments on the Oxidation of Sewage without the Aid pf Filters". *Journal Society Chemical Industries*, vol. 33, pp. 523, 1122.
- Borghei, S.; Hosseini, S. (2004). "The treatment of phenolic wastewater using a moving bed biofilm reactor". *Process Biochemistry*, Vol 29, pp 1177-1181.
- Calderón Mólgora, C. G. (2005). Identificación y descripción de los sistemas secundarios de tratamiento de aguas residuales. Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, CONAGUA.
- Canepa, L. (2008). Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, Perú.
- Chernicharo, C. ; Van haandel A.; Foresti, E; Cybis, L. Introdução. In: PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, 2001. pp. 19-34.
- Dwyer Instruments, Inc. (2019). Manual de instrucciones Dwyer Bulletin F-33. Series VF Visi-Float® Flowmeters. Specifications - Installation and Operating Instructions. U.S.A.
- Isac, L., Rodríguez, E., Salas, M. D., Fernández, N., GBS, G. B. S., Pérez-Uz, B., & Serrano, S. (1994). *Protozoos en el fango activo*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Biología.
- Izquierdo, B. K. H. (2006). "Estudo do comportamento de um sistema de lodos ativados com Reator de leito móvel (MBBR)". Universidad Federal de Rio de Janeiro. Brasil.
- Jahren, S, J; Rintala, J, A; Odegaard, H. (2002) "Aerobic moving bed biofilm reactor treating thermomechanical pulping whitewater under thermophilic conditions". *Water Research*, Vol 36, pp 1067-1075.
- Lasa, I., del Pozo, J. L., Penadés, J. R., & Leiva, J. (2004). *Biofilms bacterianos*. Instituto de Agrobiotecnología y Recursos Naturales y Departamento de Producción Agraria, 37, 14-18.

- León, J. y Ochoa, R. (2016). "Metodología para el desarrollo de lodo granular aerobio bajo distintas condiciones de carga volumétrica". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Luostarinen, S; Luste, S; Valentin, L; Rintala, J. (2006) "Nitrogen removal from on-site treated anaerobic effluents using intermittently aerated moving bed biofilm reactors at low temperatures". *Water Research*, Vol 40, pp 1607-1615.
- Metcalf y Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento y Reutilización*. (3ra ed). New York McGraw-Hill, Inc.
- Metcalf y Eddy (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. (4th ed). New York McGraw-Hill, Inc.
- Minegatti de Oliveira, D. (2008). "Caracterização dos parâmetros de controle e avaliação de desempenho de um Reator Biológico com Leito Móvel (MBBR)". Universidad Federal de Rio de Janeiro. Brasil.
- Moeller, G., & Tomasini, A. (2010). Microbiología de lodos activados. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 148–208.
- Nicolella C., van Loosdrecht M. C. M. y Heijnen J. J. (2000) Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. *Journal of Biotechnology*. 80, 1-33.
- Odegaard, H. (1999). "The Moving Bed Biofilm Reactor". Norwegian University of Science and Technology, Norway. *Water Environmental Engineering and Reuse of Water*, Hokkaido Press, pp 250-305.
- Odegaard, H. (2006). "Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process". *Water Science and Technology*. Vol. 53, No.9, pp 17–33.
- Odegaard, H., Gisvold, B., Strickland, J. (2000). "The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process." *Water Science and Technology*, Vol.41, No.4-5, pp 383-391.
- Odegaard, H; Rusten, B; Badin, H (1993) "Small wastewater treatment plants based on moving bed biofilm reactor". *Water Science and Technology*, 28 (10), 351-359.
- Odegaard, H; Rusten, B; Westrum, T (1994) "A new moving bed biofilm reactor – application and results". *Water Science and Technology*, 29 (10-11), 157-165.
- OPS. CEPIS. (2005). *Guías para la construcción de reservorios elevados de agua potable*. Perú.

- Orantes, J. C., González - Martínez, S. (2010). "A new low-cost biofilm carrier for the treatment of municipal wastewater in a moving bed reactor". Mexican Council for Science and Technology (CONACYT). México.
- Palomino Lucano, G., Ballón Jomeque, M. (2007). "Tratamiento de aguas residuales por procesos de Biopelícula". Universidad Nacional de Ingeniería. Lima.
- Pastorelli, G; Andreottola, G. (1997) "Pilot-plant experimental with moving bed biofilm reactors". *Waste Science and Technology*, 36 (1), 43-50.
- Pérez Carrión, J.M. (1992). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención, Tomo II. Manual de evaluación. Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad de Agua para Consumo Humano. Perú.
- Reynolds, T.D. y Richards, P.A. (1995). *Unit operations and processes in environmental engineering*. (2ª ed) (pp.798).
- Romero Granda, P. A. (2015). "Utilización de materiales de reciclaje como medio de soporte en reactores aerobios de biopelícula para tratamiento de agua residual doméstica". Universidad Técnica de Machala. Ecuador.
- Romero, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales – Teoría y principios de diseño*. 3ra. Edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Colombia.
- Rusten, B; Hellstrom, B; Hellstrom, F; Sehested, O; Skjelfoss, E; Svendsen, B (2000) "Pilot testing and preliminary design of moving bed biofilm reactors for nitrogen removal at the FREVAR wastewater treatment plant". *Water Science and Technology*, 41 (4-5), 13-20.
- Rusten, B; Kolkinn, O; Odegaard, H. (1997). "Moving bed biofilm reactors and chemical precipitation for high efficiency treatment of wastewater from small communities". *Water Science and Technology*. 35 (6), 71-79.
- Rusten, B; McCoy, M; Proctor, R; Siljudalen, Jon G. (1998) "The innovative moving bed biofilm reactor/Solids contact reaeration process for secondary treatment of municipal wastewater". *Water Environment Research*, 70 (5), 1083-1089.
- Rusten, B; Siljudalen, J; Nordeidet, B. (1994) "Upgrading to nitrogen removal with the KMT moving bed biofilm process". *Water Science and Technology*, Vol 29 (12), 185-195.

- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (2017). APHA, AWWA, WEF, 23rd Edition.
- SUNNAS (2018). Benchmarking Regulatorio de las Empresas Prestadoras (EPS) 2018. Informe N° 0906-2018-SUNNAS-120-F, 25-27.
- Von Sperling, M. (1996). Principios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Principios Básicos do Tratamento de Esgotos, 2ª Ed. Vol 2. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 211p.
- Zalakain, G.; Manterola, G. (2011). Procesos avanzados de biomasa fija sobre lecho móvil para el tratamiento de aguas residuales en la industria farmacéutica. Tecnología industrial, 99-101.

CAPITULO 9. ANEXOS

9.1 ANEXO N°01: Registro de mediciones diarias: turbiedad, pH, O.D., temperatura, caudales y horarios de bombeo.

Tabla 9.1. Registro de mediciones diarias de Turbiedad, pH y O.D. en la Etapa N°01

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%
1	09/05/18	12:00	85.9	40.6	28.4	24.7	20.5	7.08	7.97	7.82	7.69	7.50	0.63	6.63	7.02	4.28	3.74
2	10/05/18	11:55	118.0	43.5	40.8	22.9	26.7	6.94	7.73	SR	7.38	7.36	0.82	6.31	5.92	2.44	1.11
3	11/05/18	10:25	91.2	56.4	54.2	8.8	8.8	6.99	7.72	7.83	7.41	7.44	-	6.81	6.85	3.05	3.52
4	14/05/18	16:29	129.0	66.5	80.4	7.3	31.2	6.99	7.69	7.67	7.30	7.33	1.44	6.70	6.72	0.70	0.67
5	15/05/18	12:20	199.0	73.2	78.3	27.1	31.9	6.95	7.61	7.66	7.37	7.38	-	5.49	5.16	0.46	0.66
6	16/05/18	15:50	251.0	104.0	73.0	21.9	16.4	7.06	7.71	7.76	7.44	7.43	1.19	4.96	5.29	2.11	0.66
7	17/05/18	14:50	176.0	43.3	85.7	21.0	18.3	7.15	7.75	7.76	7.72	7.57	-	5.48	6.12	2.92	1.85
8	21/05/18	16:05	180.0	87.0	68.9	19.6	15.4	7.33	7.92	7.95	7.57	7.45	0.08	7.43	7.20	3.15	2.57
9	22/05/18	11:15	126.0	120.0	17.3	13.5	20.9	7.09	7.83	7.82	7.60	7.58	-	7.00	6.89	1.92	2.48
10	23/05/18	14:25	124.0	70.0	74.5	16.1	18.1	6.88	7.71	7.73	7.61	7.54	-	6.96	6.99	4.29	4.31
11	24/05/18	11:10	122.0	40.2	41.5	11.0	12.4	6.82	7.59	7.65	7.49	7.53	-	6.80	7.06	2.89	4.19
12	25/05/18	14:45	89.8	55.5	28.4	11.8	6.9	7.02	7.95	7.84	7.68	7.67	0.06	7.19	7.16	5.23	5.45
13	28/05/18	14:20	126.0	57.5	42.8	17.5	12.6	7.15	7.68	7.67	7.49	7.50	0.56	7.50	7.55	2.15	3.64
14	29/05/18	14:25	138.0	35.2	33.7	16.3	9.3	6.87	7.75	7.76	7.59	7.70	0.15	7.25	7.24	3.29	5.98
15	30/05/18	14:45	54.4	42.5	27.7	12.5	10.5	7.04	7.71	7.80	7.68	7.73	-	7.31	7.10	5.52	6.56
16	31/05/18	10:51	170.0	39.8	31.9	13.6	16.6	6.95	7.77	7.73	7.65	7.57	0.36	6.99	6.98	5.34	3.65
17	01/06/18	15:25	191.0	62.8	64.9	12.5	12.8	7.19	7.82	7.75	7.69	7.68	-	7.09	7.01	5.52	5.67

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%
18	05/06/18	10:31	98.4	155.0	41.6	8.6	9.9	7.14	7.68	7.68	7.65	7.63	0.90	7.07	7.24	6.35	6.21
19	06/06/18	16:00	125.0	83.4	71.2	9.0	9.2	6.88	7.59	7.62	7.64	7.56	0.91	6.42	6.31	5.77	5.58
20	07/06/18	16:00	149.0	81.3	88.7	4.9	11.9	7.11	7.73	7.73	7.72	7.07	0.02	6.68	7.14	6.18	5.89
21	12/06/18	11:35	37.0	60.1	40.0	4.9	4.6	7.31	7.67	7.57	7.55	7.58	-	7.66	7.24	5.33	6.76
22	13/06/18	14:05	107.0	166.0	49.8	9.9	10.4	7.15	7.74	7.62	7.65	7.55	-	6.91	7.26	5.09	5.10
23	14/06/18	11:15	129.0	86.4	28.8	9.8	10.1	7.13	7.72	7.66	7.64	7.56	-	7.27	7.38	5.46	5.54
24	15/06/18	11:35	137.0	53.6	27.5	10.2	14.6	7.03	SR	7.50	7.56	7.39	-	6.62	6.87	5.61	5.34
25	18/06/18	13:15	301.0	43.5	55.6	8.3	7.3	6.78	7.12	7.22	7.18	7.17	-	7.86	7.89	4.47	5.03
26	19/06/18	13:35	182.0	102.0	50.3	12.5	7.8	7.67	8.04	7.89	7.80	8.69	-	7.39	7.26	5.73	5.97
27	20/06/18	15:40	191.0	66.4	50.6	11.2	10.3	7.76	8.15	8.02	7.93	7.93	0.05	7.82	8.06	5.78	6.43
28	21/06/18	15:55	192.0	58.9	39.5	11.9	8.7	7.54	7.98	7.87	7.89	7.90	-	7.31	7.25	6.15	6.87
29	22/06/18	10:33	172.0	88.8	30.5	12.3	8.5	7.58	8.00	7.96	8.04	8.03	-	6.99	7.08	5.70	6.47
30	26/06/18	16:15	106.0	53.1	39.7	7.7	11.7	8.20	7.96	7.82	7.88	7.76	2.15	7.63	7.93	5.11	4.68
31	27/06/18	14:15	152.0	83.2	35.8	8.4	9.6	7.54	7.87	7.83	7.83	7.75	1.14	6.77	7.44	5.23	5.17
32	28/06/18	11:15	68.7	39.1	86.2	7.4	9.9	7.10	7.68	7.60	7.60	7.51	0.93	6.51	6.69	4.84	4.49
33	03/07/18	12:15	63.2	40.8	40.6	5.9	4.9	7.10	7.61	7.56	7.52	7.48	1.01	7.46	7.73	5.83	6.17
34	04/07/18	12:30	62.9	33.7	82.6	13.0	11.2	7.13	7.62	7.65	7.63	7.59	0.35	6.88	6.57	5.82	5.55
35	05/07/18	11:12	163.0	61.4	54.0	13.7	7.6	7.13	7.66	7.64	7.46	8.10	-	6.64	6.67	4.00	5.18
36	06/07/18	12:35	159.0	45.7	54.3	7.9	7.5	7.01	7.65	7.63	7.47	7.56	-	7.24	7.24	4.47	5.22
37	09/07/18	16:40	100.0	53.9	282.0	11.8	11.4	SR	SR	SR	SR	SR	1.45	8.47	8.03	8.21	8.05
38	10/07/18	14:00	127.0	70.4	276.0	7.9	5.7	SR	SR	SR	SR	SR	-	7.37	7.34	5.68	5.99
39	11/07/18	15:30	102.0	44.0	92.5	8.0	7.1	SR	SR	SR	SR	SR	-	7.39	7.50	4.75	4.15

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%
40	12/07/18	10:45	66.8	35.3	28.7	10.7	6.2	SR	SR	SR	SR	SR	-	7.80	7.77	3.55	4.57
41	13/07/18	9:47	133.0	48.2	91.3	8.8	9.1	SR	SR	SR	SR	SR	-	7.30	7.30	4.02	4.71
42	16/07/18	16:40	162.0	26.6	61.7	6.8	7.5	7.23	7.41	7.40	7.50	7.36	1.01	8.50	7.97	4.07	3.05
43	17/07/18	11:27	180.0	17.4	83.8	7.0	7.8	7.43	7.39	7.61	7.45	7.61	-	7.80	7.04	5.58	3.89
44	18/07/18	12:22	154.0	32.2	60.8	6.5	6.4	7.46	7.87	7.93	7.76	7.65	-	8.37	8.33	6.91	5.54
45	19/07/18	15:00	74.9	34.3	47.0	7.8	6.8	7.18	7.72	7.68	7.57	7.70	-	6.50	6.87	4.16	4.03
46	20/07/18	12:22	97.0	23.7	39.2	11.2	8.9	7.41	7.84	7.64	7.74	7.67	0.75	6.23	6.69	4.50	4.26
47	25/07/18	14:55	108.0	128.0	71.9	12.0	11.1	7.61	8.11	8.06	8.06	8.05	1.79	7.38	7.53	6.19	6.87
48	26/07/18	16:30	94.3	49.0	65.0	12.9	12.8	7.48	8.09	8.05	8.12	8.06	0.78	7.55	7.65	6.48	6.97
49	31/07/18	12:38	97.1	60.2	107.0	4.7	6.8	7.95	8.12	8.03	8.08	7.97	1.31	8.01	7.71	6.90	7.27
50	01/08/18	11:23	198.0	48.4	51.9	3.6	3.6	8.18	8.24	8.07	8.16	8.11	0.64	7.65	7.58	5.84	6.53
51	02/08/18	9:45	156.0	78.1	96.5	6.3	6.6	8.02	8.44	8.37	8.33	8.29	0.86	7.53	7.20	5.21	5.78
52	03/08/18	10:05	170.0	75.5	125.0	8.8	9.4	7.92	8.38	8.37	8.31	8.35	0.14	6.95	6.35	5.76	5.46
53	07/08/18	15:20	119.0	46.5	60.7	12.3	9.5	7.51	7.86	7.84	7.92	7.78	1.04	7.78	7.78	6.84	6.94
54	08/08/18	12:30	126.0	55.6	63.2	12.9	10.9	7.54	8.00	7.96	7.78	7.84	0.62	7.74	7.85	6.30	6.53
55	09/08/18	9:35	153.0	35.4	48.0	13.0	8.1	7.59	8.17	8.05	8.00	7.97	0.40	7.77	8.20	6.88	6.79
56	10/08/18	15:45	122.0	54.0	29.8	9.2	6.4	7.84	8.23	8.19	8.16	8.12	0.80	7.62	7.83	6.60	6.86
57	14/08/18	13:00	91.1	13.5	88.4	8.7	6.1	8.18	8.49	8.30	8.47	8.25	1.36	7.48	7.34	7.38	7.25
58	15/08/18	14:31	61.0	18.2	45.0	8.7	7.7	7.75	8.43	8.32	8.42	8.30	2.14	7.04	7.18	6.65	6.23
59	16/08/18	16:15	105.0	21.8	26.4	10.2	7.7	7.72	8.28	8.23	8.41	8.18	1.43	6.47	6.57	5.75	5.46
60	17/08/18	16:00	110.0	24.4	43.7	8.1	8.9	7.93	8.34	SR	8.42	8.32	1.53	6.81	6.95	6.31	6.16
61	21/08/18	16:20	106.0	39.3	90.0	8.2	7.2	8.13	8.33	8.17	8.34	8.20	1.68	6.87	7.03	6.90	6.81

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD (UNT)					PH					OXIGENO DISUELTO (mg/L)				
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%
62	24/08/18	12:38	186.0	25.1	56.6	8.5	5.9	7.92	8.19	8.14	8.15	8.16	0.30	7.66	8.05	3.16	5.50
63	28/08/18	14:20	137.0	77.6	120.0	8.1	11.4	7.89	8.29	8.24	8.29	8.23	1.14	6.07	6.86	6.28	6.28
64	29/08/18	9:52	158.0	51.3	72.4	11.1	15.0	8.04	8.42	8.39	8.41	8.35	-	6.73	6.87	6.01	6.17
65	31/08/18	11:41	318.0	53.7	44.8	10.4	6.7	8.10	8.27	8.24	8.17	8.25	-	7.11	7.40	3.07	4.66
66	04/09/18	11:16	128.0	69.8	24.5	9.0	11.0	8.17	8.38	8.29	8.37	8.25	-	6.67	6.84	6.34	6.25
67	05/09/18	8:53	145.0	39.0	36.4	8.0	10.1	8.07	8.43	8.33	8.45	8.30	-	6.53	6.16	6.16	5.71
68	06/09/18	11:36	219.0	25.0	44.9	14.3	9.3	8.27	8.59	8.49	8.38	8.41	-	6.88	6.70	2.97	5.50
69	07/09/18	12:23	195.0	62.8	95.6	9.6	8.7	8.31	8.68	8.54	8.62	8.56	-	6.08	5.89	4.77	5.55
70	11/09/18	15:00	122.2	48.0	51.6	11.8	10.2	8.00	8.50	8.17	8.46	8.09	0.90	6.36	6.34	5.98	6.20
71	12/09/18	9:50	80.1	41.4	315.0	14.4	9.5	7.89	8.47	8.13	8.50	8.17	1.73	6.54	6.21	6.02	6.39
72	13/09/18	10:47	78.6	72.7	195.0	18.7	10.8	7.92	8.48	8.24	8.38	8.23	1.43	6.32	5.57	3.94	5.31
73	14/09/18	10:17	72.0	66.7	82.0	14.3	9.9	7.87	8.47	8.31	8.38	8.27	0.36	6.24	6.76	4.56	5.53
74	18/09/18	13:45	102.0	136.0	39.7	9.8	7.8	8.15	8.42	8.12	8.38	8.17	1.48	6.29	6.44	5.92	6.67
75	19/09/18	8:45	144.0	373.0	150.0	24.2	13.5	7.99	8.48	8.48	8.46	8.45	0.62	4.19	5.34	3.73	5.41
76	20/09/18	13:35	251.0	197.0	192.0	25.6	14.6	8.00	8.54	8.50	8.59	8.52	0.23	4.04	4.87	4.50	4.91
77	21/09/18	14:41	253.0	102.0	342.0	16.1	13.4	7.94	8.48	8.41	8.46	8.39	-	3.83	4.34	3.04	3.45
78	25/09/18	16:17	216.0	101.0	59.3	12.6	10.0	8.03	8.48	8.17	8.48	8.20	0.08	5.16	5.44	4.97	5.59
79	27/09/18	10:00	158.0	69.6	36.4	13.2	9.3	7.98	8.46	8.25	8.34	8.31	-	5.08	5.10	3.96	5.21
80	28/09/18	10:07	188.0	180.0	275.0	11.6	13.4	7.86	8.37	8.19	8.30	8.17	-	5.13	5.85	4.68	2.69
81	02/10/18	11:23	165.0	64.3	176.0	8.2	12.5	7.84	8.30	7.87	7.87	7.90	-	5.49	5.76	3.55	4.83
82	03/10/18	9:50	224.0	30.6	129.0	9.4	11.2	7.83	8.35	7.85	8.20	7.84	-	5.32	5.30	3.99	4.68
83	04/10/18	10:05	127.0	63.8	384.0	9.8	11.2	7.91	8.24	7.74	8.12	7.78	-	5.11	5.32	2.78	4.11

Tabla 9.2. Registro de mediciones diarias de Temperatura en la Etapa N°01

N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)					N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)						
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%				AMB.	A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	AMB.
1	09/05/18	12:00	25.70	24.40	25.60	25.30	25.30	25.90	22	13/06/18	14:05	18.80	18.40	18.10	18.20	18.00	18.80
2	10/05/18	11:55	23.90	22.90	23.00	23.00	22.80	24.60	23	14/06/18	11:15	17.80	17.60	17.60	17.50	17.40	17.70
3	11/05/18	10:25	21.00	20.80	20.70	20.50	20.50	20.60	24	15/06/18	11:35	17.90	17.70	17.50	17.60	17.50	18.70
4	14/05/18	16:29	23.70	23.50	22.80	22.40	22.20	26.10	25	18/06/18	13:15	18.20	17.70	17.60	17.60	17.50	17.90
5	15/05/18	12:20	25.10	23.10	23.10	23.10	24.80	26.80	26	19/06/18	13:35	18.20	17.90	17.90	17.90	17.80	18.40
6	16/05/18	15:50	23.90	23.40	23.40	24.10	23.40	26.60	27	20/06/18	15:40	18.50	18.10	17.90	18.00	17.90	18.50
7	17/05/18	14:50	22.70	22.10	23.30	23.10	22.00	25.10	28	21/06/18	15:55	19.10	18.70	18.40	18.40	18.30	19.60
8	21/05/18	16:05	22.00	20.80	20.80	21.00	20.70	24.60	29	22/06/18	10:33	17.90	17.80	17.80	17.80	17.70	17.90
9	22/05/18	11:15	22.10	21.60	21.40	21.80	21.80	22.30	30	26/06/18	16:15	19.40	18.90	18.70	18.60	18.60	19.20
10	23/05/18	14:25	23.00	22.20	22.10	22.10	22.10	23.50	31	27/06/18	14:15	19.30	18.70	18.60	18.60	18.50	19.10
11	24/05/18	11:10	21.60	21.30	21.30	21.70	21.70	21.40	32	28/06/18	11:15	18.50	18.30	18.30	18.20	18.30	18.20
12	25/05/18	14:45	21.00	20.70	20.40	20.50	20.60	20.90	33	03/07/18	12:15	19.80	19.20	19.00	19.20	19.00	19.40
13	28/05/18	14:20	21.80	20.90	20.60	20.50	20.60	22.30	34	04/07/18	12:30	18.70	18.60	18.40	18.50	18.40	18.20
14	29/05/18	14:25	21.40	20.60	20.50	20.70	20.90	22.50	35	05/07/18	11:12	19.70	19.30	19.10	19.30	19.10	20.40
15	30/05/18	14:45	20.40	20.40	20.30	20.40	20.40	20.50	36	06/07/18	12:35	19.50	19.20	19.00	19.20	19.10	19.40
16	31/05/18	10:51	19.30	18.80	18.80	18.70	18.80	18.10	37	09/07/18	16:40	18.70	18.40	18.80	18.30	18.70	18.60
17	01/06/18	15:25	18.90	19.70	19.60	19.50	19.60	19.50	38	10/07/18	14:00	18.80	18.50	18.30	18.40	18.30	19.40
18	05/06/18	10:31	18.90	18.60	18.60	18.50	18.60	18.30	39	11/07/18	15:30	21.00	20.80	20.60	20.70	20.80	21.20
19	06/06/18	16:00	19.20	18.90	18.60	18.70	18.60	18.60	40	12/07/18	10:45	18.70	18.50	18.40	18.40	18.30	18.90
20	07/06/18	16:00	19.40	19.10	19.00	19.00	19.00	19.20	41	13/07/18	9:47	19.80	19.50	19.50	19.60	19.40	21.00
21	12/06/18	11:35	18.00	17.80	17.70	17.70	17.70	17.80	42	16/07/18	16:40	19.10	18.80	18.70	18.80	18.70	18.40

N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)						N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)					
			A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	AMB.				A-1	R5%	R10%	E5%	E10%	AMB.
43	17/07/18	11:27	18.50	18.10	18.20	18.10	18.20	19.20	64	29/08/18	9:52	17.70	18.20	17.90	17.90	17.90	17.30
44	18/07/18	12:22	17.90	17.80	17.80	17.80	17.60	18.60	65	31/08/18	11:41	18.70	18.20	18.00	18.10	18.00	18.30
45	19/07/18	15:00	20.20	19.80	19.70	19.70	19.50	20.30	66	04/09/18	11:16	19.10	18.90	18.80	18.70	18.80	18.80
46	20/07/18	12:22	19.10	18.80	18.80	18.80	18.70	19.80	67	05/09/18	8:53	18.20	17.90	17.80	17.90	17.80	17.80
47	25/07/18	14:55	19.30	18.80	18.60	18.70	18.60	20.00	68	06/09/18	11:36	19.60	19.20	19.30	19.30	19.30	19.40
48	26/07/18	16:30	18.40	18.10	18.10	18.10	18.10	18.40	69	07/09/18	12:23	21.20	20.30	20.10	20.10	20.10	22.20
49	31/07/18	12:38	18.20	18.10	17.80	17.90	17.70	18.10	70	11/09/18	15:00	19.30	19.00	18.90	19.00	19.00	19.30
50	01/08/18	11:23	18.80	18.50	18.10	18.20	18.10	18.60	71	12/09/18	9:50	17.70	17.40	17.40	17.30	17.30	17.90
51	02/08/18	9:45	17.70	17.60	17.50	17.50	17.30	17.50	72	13/09/18	10:47	19.00	18.80	18.80	18.70	18.90	19.70
52	03/08/18	10:05	17.90	17.80	17.70	17.70	17.60	17.80	73	14/09/18	10:17	19.70	19.20	19.10	19.20	19.20	19.30
53	07/08/18	15:20	17.90	17.60	17.60	17.60	17.50	17.80	74	18/09/18	13:45	19.20	19.00	18.80	18.80	18.70	18.80
54	08/08/18	12:30	17.70	17.60	17.60	17.70	17.70	18.40	75	19/09/18	8:45	17.70	17.60	17.70	17.50	17.50	17.10
55	09/08/18	9:35	17.40	17.20	17.00	17.00	17.00	16.70	76	20/09/18	13:35	18.80	18.40	18.20	18.20	18.20	19.30
56	10/08/18	15:45	18.00	17.70	17.50	17.50	17.50	17.50	77	21/09/18	14:41	21.20	20.60	20.20	20.40	20.30	22.00
57	14/08/18	13:00	18.60	18.30	18.00	18.30	18.00	19.80	78	25/09/18	16:17	20.30	19.90	19.50	19.70	19.40	20.30
58	15/08/18	14:31	21.20	20.90	20.70	21.00	20.60	21.80	79	27/09/18	10:00	19.30	19.20	19.10	19.10	19.00	19.30
59	16/08/18	16:15	20.20	20.60	20.40	20.80	19.90	20.00	80	28/09/18	10:07	18.90	18.70	18.70	18.60	18.50	17.90
60	17/08/18	16:00	20.10	19.60	19.50	19.60	19.60	19.00	81	02/10/18	11:23	22.50	22.20	22.20	22.40	22.20	24.40
61	21/08/18	16:20	18.90	18.40	18.30	18.30	18.30	17.90	82	03/10/18	9:50	20.60	20.40	20.40	20.20	20.10	20.00
62	24/08/18	12:38	18.70	18.20	18.00	18.50	18.30	19.30	83	04/10/18	10:05	22.20	21.90	21.80	22.10	21.80	23.80
63	28/08/18	14:20	19.30	19.00	18.70	18.90	18.70	19.00									

NOTAS: A-1: Afluente - Etapa N°01; R5%: Reactor 5%; R10%: Reactor 10%; E5%: Efluente del R5%; E10%: Efluente del R10%; SR: Sin Registro. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.3. Registro de mediciones diarias de Turbiedad, pH y O.D. en la Etapa N°02

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%
1	24/10/18	13:23	133.0	177.0	109.0	4.5	21.3	7.74	8.23	8.19	8.21	8.14	-	5.29	6.37	4.47	4.80
2	25/10/18	11:21	154.0	208.0	90.5	1.7	22.1	7.80	8.16	8.29	8.02	8.06	-	5.05	6.43	1.67	2.13
3	26/10/18	10:59	161.0	81.2	32.0	1.2	10.0	7.71	8.20	8.28	8.12	8.23	-	4.94	6.16	1.24	3.43
4	29/10/18	14:15	226.0	88.3	153.0	1.6	9.9	8.11	8.38	8.34	8.18	8.20	-	6.63	6.11	1.61	2.28
5	30/10/18	11:02	142.0	270.0	179.0	4.7	10.4	7.67	8.20	8.19	8.15	8.13	0.45	6.58	6.54	4.70	4.64
6	31/10/18	11:41	171.0	151.0	133.0	5.3	11.6	7.69	8.03	8.09	8.07	7.97	-	5.71	6.67	5.25	4.56
7	06/11/18	11:24	139.0	122.0	86.1	4.5	8.3	8.00	8.20	8.10	8.08	7.94	-	6.12	6.55	4.45	5.14
8	07/11/18	10:37	142.0	107.0	89.6	4.4	7.1	7.74	8.07	7.94	8.07	7.81	-	5.55	6.25	4.36	4.67
9	08/11/18	9:43	159.0	126.0	105.0	16.5	17.7	7.53	7.97	7.81	7.98	7.77	-	5.08	6.09	4.42	4.81
10	09/11/18	11:16	153.0	115.0	72.4	10.1	10.9	7.88	8.14	7.93	8.14	7.85	-	5.74	6.59	4.71	4.21
11	12/11/18	14:01	194.0	117.0	210.0	14.4	10.0	8.31	8.01	7.73	8.07	7.78	3.46	6.45	5.94	4.52	3.91
12	13/11/18	11:02	142.0	110.0	80.2	9.9	6.0	7.63	8.25	7.84	8.15	7.74	0.09	5.74	6.60	4.54	4.89
13	14/11/18	10:32	162.0	112.0	55.0	11.8	8.2	7.56	8.06	7.98	8.15	7.89	0.03	5.75	6.74	5.55	5.36
14	15/11/18	10:05	144.0	99.2	113.0	13.0	9.7	7.56	8.06	7.88	8.12	7.85	0.03	6.28	6.83	6.47	6.05
15	16/11/18	15:24	169.0	89.6	46.2	11.8	5.9	7.71	8.11	7.94	8.13	7.94	0.04	6.33	6.86	5.35	6.59
16	19/11/18	16:23	306.0	42.6	37.9	5.5	2.4	8.00	7.81	7.88	8.11	7.87	0.06	7.09	7.50	4.57	5.20
17	20/11/18	14:00	69.6	29.2	59.9	9.1	4.8	7.70	8.06	7.94	8.02	7.72	0.04	6.32	6.80	4.95	6.20
18	22/11/18	10:06	115.0	36.1	47.1	6.8	3.3	7.84	8.05	7.91	8.12	7.92	0.37	6.77	6.90	6.46	6.59
19	23/11/18	16:37	186.0	41.1	31.9	19.3	5.2	7.52	8.12	8.07	8.08	8.10	0.71	5.06	5.59	4.32	5.40
20	26/11/18	15:12	369.0	74.1	23.4	4.8	3.2	8.30	8.05	7.90	8.10	8.17	2.75	7.90	7.37	4.24	5.06
21	27/11/18	11:00	101.0	140.0	38.4	22.3	3.0	7.71	8.01	8.05	7.97	8.04	1.32	6.37	6.72	4.00	5.75

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%
22	28/11/18	15:43	365.0	66.6	77.9	33.5	1.9	7.85	7.91	7.70	7.81	7.94	0.10	6.54	5.85	3.81	5.41
23	29/11/18	14:40	220.0	109.0	51.9	41.8	7.7	7.76	7.95	8.03	7.95	8.02	0.05	5.49	5.85	4.80	4.67
24	30/11/18	16:15	196.0	140.0	26.8	46.8	10.3	7.88	8.12	8.14	8.11	8.15	0.05	5.77	5.41	3.64	3.72
25	06/12/18	15:50	198.0	140.0	160.0	3.9	7.0	8.27	7.90	7.85	8.13	8.04	0.03	5.34	6.11	4.55	4.12
26	10/12/18	14:39	184.0	217.0	178.0	45.4	16.2	8.32	7.80	7.54	7.88	7.66	0.19	5.14	5.62	6.03	6.85
27	11/12/18	10:15	123.0	120.0	281.0	34.9	8.2	7.67	8.12	7.99	8.08	8.10	0.09	5.41	4.37	3.83	5.12
28	12/12/18	13:37	135.0	92.7	140.0	45.5	17.1	7.82	8.31	7.98	8.21	8.00	0.06	5.71	5.03	3.14	4.18
29	13/12/18	9:47	166.0	111.0	115.0	37.8	10.3	7.79	8.30	7.93	8.33	7.95	0.05	5.28	4.76	5.13	5.25
30	18/12/18	14:35	171.0	109.0	48.1	3.4	4.8	7.73	8.10	8.03	8.08	8.12	0.08	4.71	4.38	3.44	4.77
31	20/12/18	12:25	215.0	84.5	37.0	4.0	4.2	8.04	7.95	7.85	8.10	8.06	0.02	6.73	5.90	4.03	4.24
32	21/12/18	15:35	260.0	69.3	38.6	5.2	5.8	7.66	7.92	7.91	8.03	8.11	0.09	4.84	4.60	5.15	5.80
33	28/12/18	16:11	179.0	73.5	109.0	4.9	4.8	7.97	7.68	7.59	8.08	7.94	0.06	5.92	6.10	4.92	4.78
34	31/12/18	15:14	163.0	55.2	56.8	5.3	5.6	7.84	7.61	7.63	7.64	7.74	0.27	5.61	5.46	5.34	5.64
35	02/01/19	10:02	110.0	69.7	37.6	5.2	5.7	7.65	7.61	7.73	7.65	7.70	0.09	6.32	6.63	5.23	5.73
36	03/01/19	16:10	104.0	121.0	116.0	4.6	5.1	7.70	7.85	7.97	8.02	8.12	0.28	3.83	4.31	4.58	5.07
37	04/01/19	14:55	170.0	83.4	83.4	3.4	5.0	7.49	7.61	7.87	7.92	7.92	0.11	2.56	4.48	3.39	5.00
38	07/01/19	14:31	187.0	84.1	53.1	4.5	5.5	8.00	7.47	7.75	7.77	7.83	0.17	3.46	5.24	4.50	5.51
39	08/01/19	14:19	96.0	93.9	43.0	8.2	2.4	7.64	7.72	8.03	7.85	8.04	0.68	4.00	5.70	4.21	5.08
40	09/01/19	10:01	94.9	86.3	52.6	10.9	3.9	7.72	7.79	8.06	7.82	8.11	0.43	4.51	6.11	4.25	5.44
41	10/01/19	14:40	115.0	89.6	19.7	9.1	14.3	7.73	7.75	8.09	7.82	8.12	0.29	4.74	6.24	4.74	6.04
42	11/01/19	14:40	86.1	82.1	21.9	5.2	5.6	7.75	7.90	8.21	8.06	8.24	0.37	5.70	4.11	5.94	4.43
43	15/01/19	11:37	100.0	71.6	29.9	5.4	4.2	7.73	7.97	8.09	8.10	8.07	0.49	4.86	5.74	4.69	5.54

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD					PH					OXIGENO DISUELTO				
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%
44	16/01/19	9:51	120.0	121.0	39.4	5.7	8.5	7.94	8.18	8.16	8.23	8.22	0.33	4.72	5.45	5.03	5.78
45	17/01/19	13:33	100.0	86.0	39.6	8.8	4.8	7.77	7.89	8.12	8.14	8.23	0.42	5.43	6.38	4.64	4.92
46	22/01/19	14:51	193.0	8.1	22.9	18.1	4.1	7.50	8.06	8.02	8.09	8.02	0.46	3.25	4.34	3.40	5.08
47	23/01/19	14:35	99.7	8.2	84.4	19.5	21.4	7.62	8.16	8.14	8.27	8.08	0.55	3.87	4.83	4.01	4.20
48	24/01/19	9:25	118.0	52.2	41.3	4.8	16.9	7.76	8.12	8.13	8.32	8.24	0.33	3.65	4.29	4.90	4.52
49	25/01/19	11:24	105.0	54.0	108.0	17.4	14.9	7.75	8.07	8.07	8.19	8.12	0.49	4.52	4.90	5.16	5.48
50	28/01/19	14:25	269.0	118.0	125.0	11.9	8.3	7.49	7.34	7.23	7.62	7.88	0.05	3.14	3.87	3.98	4.68
51	30/01/19	8:58	121.0	122.0	85.1	11.4	25.6	7.67	8.01	7.64	7.64	7.59	0.14	4.39	4.43	4.88	4.41
52	31/01/19	12:55	94.6	93.5	65.2	13.7	25.3	7.64	7.93	7.37	7.99	7.48	0.16	4.55	4.70	4.19	3.64
53	01/02/19	15:39	101.0	137.0	128.0	17.8	26.9	7.50	7.35	7.37	7.57	7.42	0.15	4.38	4.30	3.71	3.57
54	04/02/19	13:45	211.0	164.0	153.0	2.4	4.8	8.04	7.58	7.56	7.94	7.84	0.05	7.04	6.63	3.80	3.57
55	05/02/19	11:10	87.6	179.0	89.0	3.1	2.5	7.69	7.77	7.59	7.88	7.81	0.21	6.63	5.84	4.73	5.53
56	06/02/19	10:37	109.0	85.9	99.8	26.1	5.6	7.80	7.96	7.73	7.81	7.87	0.52	6.63	6.15	3.98	5.65
57	07/02/19	9:18	104.0	68.9	113.0	8.4	5.3	7.83	7.85	7.78	7.69	7.95	0.28	6.74	6.20	5.39	5.63
58	08/02/19	14:36	198.0	71.0	85.2	9.4	6.0	7.71	7.89	7.60	7.90	7.75	0.08	5.49	5.16	5.00	4.98
59	12/02/19	10:10	84.9	70.9	120.0	3.5	5.9	7.76	7.81	7.86	7.88	7.82	0.05	7.81	7.86	6.08	5.89
60	14/02/19	9:04	70.2	72.3	101.0	8.0	5.4	7.69	7.73	7.93	7.82	7.77	0.09	7.73	7.93	5.50	5.36
61	18/02/19	11:42	168.0	72.8	67.0	7.6	5.4	7.62	7.51	7.44	7.57	7.39	0.09	7.51	7.44	5.23	5.40
62	19/02/19	14:34	52.2	60.7	53.7	3.5	5.7	7.42	7.71	7.65	7.79	7.79	0.14	7.71	7.65	4.84	5.65
63	20/02/19	9:43	93.4	77.7	59.6	5.6	6.1	7.74	7.81	7.73	7.87	7.77	0.11	7.81	7.73	5.27	6.06
64	21/02/19	9:46	88.5	58.3	58.0	4.7	5.6	7.54	8.00	7.94	8.01	7.95	0.09	8.00	7.44	5.79	5.56
65	22/02/19	10:05	71.8	46.7	54.7	10.1	5.5	7.75	7.95	8.00	7.97	7.92	0.07	7.95	8.00	5.94	5.54

N° Día	Fecha	Hora	TURBIEDAD (UNT)					PH					OXIGENO DISUELTO (mg/L)				
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	A-2	R20%	R40%	E20%	E40%
66	25/02/19	15:10	133.0	65.3	56.6	3.6	4.9	7.92	7.23	7.49	7.62	7.81	0.14	7.23	7.49	4.98	4.87
67	27/02/19	9:37	96.6	61.7	48.8	16.4	5.0	7.76	7.70	7.89	7.77	7.90	0.08	7.70	7.89	5.07	4.97
68	28/02/19	10:57	88.3	51.5	40.5	16.8	4.8	7.70	7.71	7.92	7.73	7.93	0.07	7.71	7.92	4.49	4.76
69	01/03/19	10:46	89.2	57.1	88.7	35.2	5.2	7.51	7.46	7.74	7.59	7.76	0.07	7.46	7.74	2.78	5.16

Tabla 9.4. Registro de mediciones diarias de Temperatura en la Etapa N°02

N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)						N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)					
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	AMB.				A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	AMB.
1	24/10/18	13:23	20.40	20.10	20.00	20.20	20.00	21.40	17	20/11/18	14:00	23.60	23.40	23.30	23.50	23.60	25.70
2	25/10/18	11:21	20.90	20.60	20.40	20.70	20.40	23.30	18	22/11/18	10:06	20.90	21.20	21.00	21.00	21.00	20.90
3	26/10/18	10:59	21.50	21.20	21.10	21.00	20.90	21.10	19	23/11/18	16:37	23.00	23.50	23.00	23.10	22.70	23.00
4	29/10/18	14:15	23.60	22.20	21.70	22.50	22.10	24.00	20	26/11/18	15:12	24.90	23.60	23.00	23.90	23.40	24.40
5	30/10/18	11:02	21.50	21.40	21.20	21.40	21.20	21.80	21	27/11/18	11:00	23.70	23.40	23.30	23.10	23.10	25.40
6	31/10/18	11:41	23.60	23.00	23.00	23.10	23.20	26.10	22	28/11/18	15:43	24.70	24.00	23.50	23.70	23.40	25.00
7	06/11/18	11:24	22.60	22.20	21.90	22.20	22.10	23.60	23	29/11/18	14:40	24.30	24.10	23.70	24.00	23.60	25.90
8	07/11/18	10:37	23.10	22.50	22.30	22.60	22.60	24.70	24	30/11/18	16:15	24.00	23.80	23.60	23.90	23.50	25.10
9	08/11/18	9:43	22.00	21.80	21.50	21.40	21.40	21.00	25	06/12/18	15:50	26.00	24.80	24.50	24.90	24.50	26.30
10	09/11/18	11:16	22.90	22.70	22.30	22.50	22.50	23.70	26	10/12/18	14:39	26.70	25.40	24.80	25.20	25.00	26.70
11	12/11/18	14:01	22.50	22.10	21.80	22.10	21.80	22.80	27	11/12/18	10:15	25.10	24.70	24.50	24.50	24.40	27.10
12	13/11/18	11:02	22.70	22.40	22.20	22.20	22.20	23.00	28	12/12/18	13:37	25.20	24.90	24.80	25.00	24.70	26.20
13	14/11/18	10:32	21.90	21.80	21.60	21.70	21.70	22.40	29	13/12/18	9:47	23.70	23.30	23.20	23.10	23.10	23.40
14	15/11/18	10:05	21.30	21.20	21.00	21.10	21.20	20.40	30	18/12/18	14:35	26.90	26.50	26.20	26.30	26.00	28.30

N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)						N° Día	Fecha	Hora	TEMPERATURA (°C)					
			A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	AMB.				A-2	R20%	R40%	E20%	E40%	AMB.
15	16/11/18	15:24	21.30	21.30	21.30	21.20	21.40	21.00	49	25/01/19	11:24	27.50	27.10	27.20	27.10	27.00	29.80
16	19/11/18	16:23	24.00	23.70	23.30	24.60	24.20	23.50	50	28/01/19	14:25	30.70	30.00	30.20	30.00	30.00	32.30
31	20/12/18	12:25	27.20	25.90	25.70	26.10	26.00	28.60	51	30/01/19	8:58	26.60	25.40	26.10	26.40	26.20	27.00
32	21/12/18	15:35	26.50	26.30	25.90	26.10	25.60	27.60	52	31/01/19	12:55	28.70	28.40	28.50	28.40	28.80	31.50
33	28/12/18	16:11	26.70	26.40	26.10	26.70	26.60	26.90	55	05/02/19	11:10	28.80	28.60	28.40	28.60	28.20	33.10
34	31/12/18	15:14	25.30	24.80	24.50	24.60	24.20	25.10	56	06/02/19	10:37	28.00	28.10	27.90	28.10	27.90	29.70
35	02/01/19	10:02	24.50	24.20	24.10	24.10	24.00	25.80	57	07/02/19	9:18	26.50	26.20	26.00	26.20	26.00	26.90
36	03/01/19	16:10	26.30	26.00	25.80	25.90	25.50	26.30	58	08/02/19	14:36	27.10	27.20	27.00	27.20	27.10	28.40
37	04/01/19	14:55	26.90	26.60	26.10	26.40	25.30	28.80	59	12/02/19	10:10	27.50	27.30	27.00	27.10	27.00	28.60
38	07/01/19	14:31	28.30	28.10	27.90	27.80	27.70	30.50	60	14/02/19	9:04	26.80	26.60	26.40	26.30	26.30	28.10
39	08/01/19	14:19	27.90	27.90	27.70	27.70	27.90	30.50	61	18/02/19	11:42	29.00	28.40	27.90	28.30	28.10	30.70
40	09/01/19	10:01	26.70	26.30	26.10	26.30	25.90	27.70	62	19/02/19	14:34	28.50	28.60	28.20	28.10	28.00	30.60
41	10/01/19	14:40	25.90	25.50	25.90	25.50	25.60	26.50	63	20/02/19	9:43	27.80	27.80	27.50	27.30	27.30	28.90
42	11/01/19	14:40	26.80	26.70	26.90	26.80	26.20	27.30	64	21/02/19	9:46	29.00	28.60	28.50	28.00	27.70	32.30
43	15/01/19	11:37	26.50	26.20	26.10	26.20	26.20	29.60	65	22/02/19	10:05	27.70	27.60	27.20	27.10	27.10	30.20
44	16/01/19	9:51	24.00	23.70	23.50	23.60	23.80	23.40	66	25/02/19	15:10	28.60	28.80	28.30	28.50	28.40	31.40
45	17/01/19	13:33	24.50	24.50	24.10	24.40	24.30	25.20	67	27/02/19	9:37	27.80	27.40	27.20	27.30	27.20	30.60
46	22/01/19	14:51	27.90	27.50	27.40	27.70	27.40	30.10	68	28/02/19	10:57	27.90	27.70	27.40	27.30	27.20	30.20
47	23/01/19	14:35	27.50	27.60	27.10	27.40	27.20	29.30	69	01/03/19	10:46	28.30	28.20	27.80	27.60	27.60	29.90
48	24/01/19	9:25	26.00	26.00	25.80	26.00	25.80	26.40									

NOTAS: A-2: Afluente - Etapa N°02; R20%: Reactor 20%; R40%: Reactor 40%; E20%: Efluente del R20%; E40%: Efluente del R40%; SR: Sin Registro. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.5. Registro de mediciones diarias de caudal en la Etapa N°01

N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)		
			R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.
1	08/05/18	16:30	150	150	C	15	29/05/18	13:48	100	100	V	28	19/06/18	15:15	150	150	C
2	09/05/18	11:00	115	125	V	15	29/05/18	15:29	150	150	C	29	20/06/18	15:25	130	125	V
2	09/05/18	15:50	150	155	C	16	30/05/18	14:40	135	145	V	29	20/06/18	16:41	150	150	C
3	10/05/18	11:53	150	150	V	16	30/05/18	16:00	150	150	C	30	21/06/18	15:45	150	155	V
3	10/05/18	16:00	155	150	C	17	31/05/18	10:51	135	145	V	30	21/06/18	16:55	150	150	C
4	11/05/18	9:50	145	135	V	18	01/06/18	13:20	150	150	V	31	22/06/18	11:25	125	125	V
4	11/05/18	10:22	150	150	C	18	01/06/18	17:02	150	150	C	31	22/06/18	14:47	110	110	C
5	15/05/18	12:00	155	150	C	19	05/06/18	10:31	145	145	V	32	25/06/18	16:50	150	150	C
6	16/05/18	14:15	135	140	V	20	06/06/18	16:00	150	150	C	33	26/06/18	16:15	150	150	C
6	16/05/18	15:45	160	155	C	21	07/06/18	16:00	130	105	V	34	27/06/18	14:15	140	145	V
7	17/05/18	14:15	135	140	V	21	07/06/18	17:09	150	150	C	34	27/06/18	15:40	150	150	C
7	17/05/18	14:43	155	160	C	22	12/06/18	12:31	125	135	V	35	28/06/18	13:10	150	155	C
8	18/05/18	16:40	135	135	C	22	12/06/18	14:24	150	150	C	36	02/07/18	15:45	160	150	C
9	21/05/18	16:00	150	155	C	23	13/06/18	15:28	160	160	C	37	03/07/18	16:20	150	155	C
10	22/05/18	10:35	145	145	C	24	14/06/18	12:14	150	150	V	38	04/07/18	12:10	145	155	V
11	23/05/18	10:50	140	140	V	24	14/06/18	14:00	160	160	C	38	04/07/18	17:00	155	155	C
11	23/05/18	14:14	150	150	C	25	15/06/18	14:10	110	120	V	39	05/07/18	10:33	140	145	V
12	24/05/18	11:10	145	140	C	25	15/06/18	16:00	75	75	C	39	05/07/18	13:55	155	150	C
13	25/05/18	14:45	135	135	V	26	17/06/18	13:00	150	150	C	40	06/07/18	15:10	155	155	C
13	25/05/18	16:01	150	150	C	27	18/06/18	16:50	160	160	C	41	09/07/18	15:00	150	150	C
14	28/05/18	12:15	150	150	C	28	19/06/18	13:55	135	140	V	42	10/07/18	14:00	150	145	V

N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)		
			R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.
42	10/07/18	15:00	150	155	C	56	02/08/18	11:31	140	140	V	69	22/08/18	15:42	125	125	V
43	11/07/18	16:20	140	155	V	57	03/08/18	11:02	135	140	V	69	22/08/18	16:48	150	155	C
43	11/07/18	16:30	155	150	C	57	03/08/18	15:53	100	100	C	70	24/08/18	12:36	150	150	V
44	12/07/18	10:30	150	150	C	58	06/08/18	12:30	150	150	C	70	24/08/18	16:20	100	100	C
45	13/07/18	10:47	130	135	V	59	07/08/18	14:50	130	130	V	71	27/08/18	15:18	150	150	C
45	13/07/18	11:00	150	150	C	59	07/08/18	16:40	155	150	C	72	28/08/18	15:20	150	150	C
46	17/07/18	11:15	150	150	C	60	08/08/18	12:10	145	140	V	72	28/08/18	10:00	145	140	V
47	18/07/18	13:07	145	145	C	60	08/08/18	16:42	150	150	C	73	29/08/18	10:13	140	140	V
48	19/07/18	16:10	125	115	V	61	09/08/18	10:00	140	75	V	73	29/08/18	11:33	150	150	C
48	19/07/18	16:22	145	145	C	61	09/08/18	15:45	155	155	C	74	31/08/18	11:28	150	150	V
49	20/07/18	12:22	155	145	V	62	10/08/18	11:20	150	80	V	74	31/08/18	14:41	155	165	C
49	20/07/18	13:20	155	155	C	62	10/08/18	16:37	110	110	C	75	03/09/18	14:50	155	160	C
50	24/07/18	16:48	150	150	C	63	14/08/18	12:08	150	145	V	76	04/09/18	12:06	140	135	V
51	25/07/18	12:06	145	140	V	63	14/08/18	12:30	150	150	C	76	04/09/18	12:22	150	155	C
51	25/07/18	14:28	150	150	C	64	15/08/18	14:31	140	140	V	77	05/09/18	9:16	125	150	V
52	26/07/18	10:21	140	140	V	64	15/08/18	15:37	155	155	C	77	05/09/18	10:14	150	150	C
52	26/07/18	14:00	100	100	C	65	16/08/18	12:18	150	150	V	78	06/09/18	12:26	115	105	V
53	30/07/18	17:00	145	150	C	65	16/08/18	13:17	145	145	C	78	06/09/18	12:58	155	150	C
54	31/07/18	10:52	105	135	V	66	17/08/18	12:25	140	120	V	79	07/09/18	11:25	130	125	V
54	31/07/18	15:02	155	155	C	66	17/08/18	14:52	110	105	C	79	07/09/18	13:07	100	100	C
55	01/08/18	17:00	155	155	C	67	20/08/18	12:55	150	150	C	80	10/09/18	14:24	150	150	C
56	02/08/18	9:30	150	150	C	68	21/08/18	13:40	135	140	C	81	11/09/18	10:17	150	150	C

N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)		
			R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.				R5%	R10%	ACT.
82	12/09/18	8:45	145	150	V	88	20/09/18	9:10	150	145	V	96	02/10/18	11:18	150	150	V
82	12/09/18	11:12	150	150	C	89	20/09/18	10:46	150	150	C	96	02/10/18	16:40	145	145	C
83	13/09/18	11:33	145	150	V	89	21/09/18	14:41	145	145	V	97	03/10/18	10:04	145	150	V
83	13/09/18	11:55	150	150	C	90	21/09/18	17:20	80	80	C	98	04/10/18	14:35	145	145	C
84	14/09/18	12:05	145	125	V	91	24/09/18	14:24	150	150	C						
84	14/09/18	12:34	150	150	C	92	25/09/18	17:03	155	155	C						
85	17/09/18	15:26	150	150	C	93	27/09/18	9:52	145	135	V						
86	18/09/18	13:45	150	150	V	93	27/09/18	11:09	150	150	C						
86	18/09/18	14:51	150	150	C	94	28/09/18	10:04	145	145	C						
87	19/09/18	9:47	150	145	C	95	01/10/18	15:25	150	150	C						

NOTAS: R5%: Reactor 5%; R10%: Reactor 10%; E5%: Efluente del R5%; E10%: Efluente del R10%; C: Calibración; V: Verificación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.6. Registro de mediciones diarias de caudal en la Etapa N°02

N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)		
			R20%	R40%	ACT.				R20%	R40%	ACT.				R20%	R40%	ACT.
1	24/10/18	13:15	145	130	V	12	13/11/18	12:50	150	150	C	24	29/11/18	14:30	150	150	V
1	24/10/18	14:53	150	150	C	13	14/11/18	10:31	145	145	V	24	29/11/18	16:14	150	150	C
2	25/10/18	11:21	150	135	V	13	14/11/18	12:51	150	150	C	25	30/11/18	15:42	140	120	V
2	25/10/18	13:55	150	150	C	14	15/11/18	12:13	125	140	V	25	30/11/18	16:14	150	150	C
3	26/10/18	10:56	140	140	C	14	15/11/18	12:27	155	155	C	26	06/12/18	15:15	150	150	C
4	29/10/18	14:15	150	150	V	15	16/11/18	12:36	145	140	V	27	10/12/18	12:25	150	150	C
4	29/10/18	17:00	150	150	C	15	16/11/18	15:30	150	150	C	28	11/12/18	10:06	145	135	V
5	30/10/18	10:59	145	110	V	16	19/11/18	16:22	155	155	C	28	11/12/18	15:37	150	150	C
5	30/10/18	16:13	150	150	C	17	20/11/18	14:00	150	150	V	29	12/12/18	13:34	135	125	V
6	31/10/18	12:30	135	135	V	17	20/11/18	15:33	150	150	C	29	12/12/18	15:00	150	150	C
6	31/10/18	15:42	100	100	C	18	21/11/18	16:51	145	140	V	30	13/12/18	11:05	145	145	V
7	06/11/18	15:00	150	150	V	18	21/11/18	17:30	150	150	C	30	13/12/18	16:56	150	150	C
7	06/11/18	15:20	150	150	C	19	22/11/18	9:34	150	150	V	31	18/12/18	10:28	150	140	V
8	07/11/18	11:36	135	140	V	19	22/11/18	17:15	150	150	C	31	18/12/18	15:38	155	155	C
8	07/11/18	13:48	150	150	C	20	23/11/18	16:33	165	170	V	32	20/12/18	12:19	150	150	C
9	08/11/18	9:53	150	140	V	20	23/11/18	16:49	150	150	C	33	21/12/18	9:31	145	145	V
9	08/11/18	16:41	150	150	C	21	26/11/18	15:11	150	150	V	33	21/12/18	16:36	150	155	C
10	09/11/18	11:30	150	140	V	21	26/11/18	16:14	155	155	C	34	28/12/18	15:17	110	110	V
10	09/11/18	14:30	155	155	C	22	27/11/18	11:01	150	145	V	34	28/12/18	17:00	115	120	C
11	12/11/18	15:10	150	150	C	22	27/11/18	12:46	155	155	C	35	31/12/18	14:45	115	120	V
12	13/11/18	12:09	150	140	V	23	28/11/18	15:43	150	150	C	35	31/12/18	15:14	125	125	C

N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)			N° Día	Fecha	Hora	CAUDAL (L/min)		
			R20%	R40%	ACT.				R20%	R40%	ACT.				R20%	R40%	ACT.
36	02/01/19	9:47	100	100	V	47	22/01/19	10:30	135	135	V	58	06/02/19	15:00	150	150	C
36	02/01/19	12:05	155	155	C	47	22/01/19	13:33	145	145	C	59	07/02/19	10:10	145	145	C
37	03/01/19	16:10	145	140	V	48	23/01/19	14:30	140	135	V	60	08/02/19	15:48	150	150	C
37	03/01/19	17:30	150	150	C	48	23/01/19	15:46	150	150	C	61	12/02/19	10:50	115	115	C
38	04/01/19	11:28	145	140	C	49	24/01/19	9:24	150	150	V	62	14/02/19	9:04	150	150	C
39	07/01/19	15:18	175	175	V	49	24/01/19	16:15	160	160	C	63	18/02/19	12:38	145	150	C
39	07/01/19	15:30	160	160	C	50	25/01/19	12:08	150	150	C	64	19/02/19	14:34	125	135	V
40	08/01/19	14:11	155	155	V	51	28/01/19	15:28	150	150	V	64	19/02/19	16:23	150	150	C
40	08/01/19	15:57	150	150	C	52	30/01/19	8:55	150	150	V	65	20/02/19	10:24	145	140	V
41	09/01/19	10:00	150	140	V	52	30/01/19	15:40	145	145	C	65	20/02/19	16:13	155	150	C
41	09/01/19	16:08	145	145	C	53	31/01/19	12:55	150	150	C	66	21/02/19	9:55	150	145	V
42	10/01/19	12:33	140	130	V	53	31/01/19	14:25	150	150	C	66	21/02/19	16:13	155	150	C
42	10/01/19	16:19	150	150	C	54	01/02/19	13:39	150	150	V	67	22/02/19	9:55	145	140	C
43	11/01/19	14:47	135	135	V	55	02/02/19	13:00	125	125	C	68	25/02/19	15:13	150	150	C
43	11/01/19	16:16	150	150	C	56	04/02/19	13:43	150	150	V	69	27/02/19	9:30	145	145	C
44	15/01/19	11:40	150	150	V	56	04/02/19	16:46	155	160	C	70	28/02/19	10:57	145	145	V
44	15/01/19	16:35	160	160	C	57	05/02/19	11:00	150	150	V	70	28/02/19	16:58	150	150	C
45	16/01/19	9:51	150	150	C	57	05/02/19	16:49	150	150	C	71	01/03/19	10:37	140	140	V
46	17/01/19	13:33	145	145	C	58	06/02/19	11:31	145	145	C	71	01/03/19	15:47	125	125	C

NOTAS: R20%: Reactor 20%; R40%: Reactor 40%; E20%: Efluente del R20%; E40%: Efluente del R40%; C: Calibración; V: Verificación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.7. Registro de horarios de bombeo de agua residual en la Etapa N°01

N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo	
		ENC.	APG.			ENC.	APG.			ENC.	APG.			ENC.	APG.
1	08/05/18	11:15	12:20	22	15/06/18	14:15	17:00	43	20/07/18	12:20	13:25	64	28/08/18	11:05	12:05
2	09/05/18	11:35	12:40	23	18/06/18	9:40	16:50	44	24/07/18	15:30	17:00	65	29/08/18	11:26	12:05
3	10/05/18	10:45	11:38	24	19/06/18	13:35	16:15	45	25/07/18	12:50	14:00	66	31/08/18	11:03	14:35
4	11/05/18	11:40	12:35	25	20/06/18	14:40	16:50	46	26/07/18	13:25	14:40	67	03/09/18	13:55	15:15
5	15/05/18	10:55	11:50	26	21/06/18	14:45	16:55	47	30/07/18	16:00	17:10	68	04/09/18	12:10	13:40
6	16/05/18	15:10	16:15	27	22/06/18	12:00	17:00	48	31/07/18	15:00	16:20	69	05/09/18	10:17	11:02
7	17/05/18	14:32	15:30	28	26/06/18	14:00	17:00	49	01/08/18	10:00	11:23	70	06/09/18	12:33	13:37
8	18/05/18	16:00	16:50	29	27/06/18	12:50	15:35	50	02/08/18	11:31	13:20	71	07/09/18	11:34	12:45
9	21/05/18	15:10	16:25	30	28/06/18	11:50	SR	51	03/08/18	11:15	12:26	72	10/09/18	13:41	15:20
10	22/05/18	11:25	12:21	31	02/07/18	12:30	15:50	52	07/08/18	14:45	16:00	73	11/09/18	11:18	12:20
11	25/05/18	15:20	17:00	32	03/07/18	12:15	14:40	53	08/08/18	14:52	15:43	74	12/09/18	10:42	12:20
12	28/05/18	11:05	13:00	33	04/07/18	13:22	15:30	54	09/08/18	15:17	16:22	75	13/09/18	11:40	12:43
13	29/05/18	14:10	16:55	34	05/07/18	12:45	13:45	55	10/08/18	14:50	15:45	76	14/09/18	12:09	13:41
14	30/05/18	15:10	17:05	35	06/07/18	12:00	15:45	56	14/08/18	12:15	13:15	77	17/09/18	15:00	17:00
15	01/06/18	16:20	18:20	36	09/07/18	12:45	14:20	57	15/08/18	14:42	16:05	78	18/09/18	14:38	SR
16	05/06/18	11:45	13:30	37	10/07/18	12:46	14:20	58	16/08/18	12:33	13:20	79	19/09/18	10:29	11:30
17	06/06/18	17:05	SR	38	11/07/18	14:40	16:05	59	17/08/18	13:20	14:50	80	20/09/18	10:33	11:40
18	07/06/18	15:05	16:45	39	12/07/18	12:40	SR	60	21/08/18	13:27	14:53	81	21/09/18	12:10	13:47
19	12/06/18	12:40	15:06	40	17/07/18	13:44	14:13	61	22/08/18	15:37	16:39	82	24/09/18	13:18	15:20
20	13/06/18	12:20	13:56	41	18/07/18	13:10	SR	62	24/08/18	12:20	13:35	83	25/09/18	14:55	16:08
21	14/06/18	12:15	14:10	42	19/07/18	16:05	17:00	63	27/08/18	13:15	15:00	84	26/09/18	13:05	14:05

85	27/09/18	11:20	12:20	86	28/09/18	11:19	12:40	87	01/10/18	12:50	14:42	88	02/10/18	13:55	15:07
----	----------	-------	-------	----	----------	-------	-------	----	----------	-------	-------	----	----------	-------	-------

Tabla 9.8. Registro de horarios de bombeo de agua residual en la Etapa N°02

N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo		N° Día	Fecha	Horario de bombeo	
		ENC.	APG.			ENC.	APG.			ENC.	APG.			ENC.	APG.
1	24/10/18	14:58	16:00	19	22/11/18	16:55	17:20	37	03/01/19	16:10	16:50	55	05/02/19	14:00	15:00
2	25/10/18	12:14	13:50	20	23/11/18	16:43	17:06	38	04/01/19	14:37	15:20	56	06/02/19	14:00	15:00
3	26/10/18	12:32	14:00	21	26/11/18	14:35	16:18	39	07/01/19	14:30	15:28	57	07/02/19	16:00	17:00
4	29/10/18	12:45	14:38	22	27/11/18	12:27	12:46	40	08/01/19	15:22	16:08	58	08/02/19	12:00	13:00
5	30/10/18	13:30	14:40	23	28/11/18	15:00	16:25	41	09/01/19	15:45	16:35	59	12/02/19	14:20	15:20
6	31/10/18	14:30	15:48	24	29/11/18	15:45	16:45	42	10/01/19	14:40	15:50	60	14/02/19	14:20	15:10
7	06/11/18	14:18	15:20	25	30/11/18	15:30	16:30	43	11/01/19	15:46	16:46	61	18/02/19	11:35	12:38
8	07/11/18	11:42	12:50	26	06/12/18	14:30	16:00	44	15/01/19	15:21	16:37	62	19/02/19	15:42	16:27
9	08/11/18	16:30	17:28	27	10/12/18	11:00	12:20	45	16/01/19	14:40	16:00	63	20/02/19	14:15	14:55
10	09/11/18	11:15	13:07	28	11/12/18	11:22	12:20	46	17/01/19	15:44	16:44	64	21/02/19	15:58	16:40
11	12/11/18	12:30	13:30	29	12/12/18	14:37	15:40	47	22/01/19	11:36	12:45	65	22/02/19	14:40	15:32
12	13/11/18	12:05	12:55	30	13/12/18	16:45	17:30	48	23/01/19	15:22	16:10	66	25/02/19	14:15	15:18
13	14/11/18	11:38	12:38	31	18/12/18	14:08	15:00	49	24/01/19	15:10	16:15	67	27/02/19	17:10	17:55
14	15/11/18	12:30	13:30	32	20/12/18	12:00	13:20	50	25/01/19	12:15	13:00	68	28/02/19	15:42	16:40
15	16/11/18	14:40	15:40	33	21/12/18	14:42	15:45	51	28/01/19	12:30	13:45	69	01/03/19	14:20	15:05
16	19/11/18	16:00	17:20	34	28/12/18	14:50	16:08	52	30/01/19	15:13	15:50	-	-	-	-
17	20/11/18	14:16	15:24	35	31/12/18	12:55	13:55	53	31/01/19	13:56	14:52	-	-	-	-
18	21/11/18	16:40	17:40	36	02/01/19	10:55	12:20	54	04/02/19	13:00	14:20	-	-	-	-

NOTAS: ENC.: Encendido de bomba; APG.: Apagado de bomba; Fuente: Elaboración propia.

9.2 ANEXO N°02: Registro de las mediciones semanales de la DBO5, DQO y cargas contaminantes

Tabla 9.9. Registro de mediciones semanales de la DBO5, DQO y cargas contaminantes en la Etapa N°01

Fecha	N° Semana	Hora	N° Dato	DBO5			CO R5% R10%	COV R5% R10%	COS R5% R10%	COS R5% R10%	N° Dato	DQO			CO R5% R10%	COV R5% R10%	COS R5% R10%	COS R5% R10%	DBO5 /DQO
				A-1	E5%	E10%						A-1	E5%	E10%					
24/05/18	3.00	10:45	1	119.72	8.16	16.08	25.86	0.31	23.05	11.53	1	238.00	55.00	53.00	51.41	0.61	45.82	22.91	0.50
31/05/18	4.00	10:40	2	170.00	14.35	32.20	36.72	0.44	32.73	16.37	2	337.00	74.00	85.00	72.79	0.87	64.88	32.44	0.50
08/06/18	5.00	SR	3	109.67	19.93	35.76	23.69	0.28	21.12	10.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14/06/18	6.00	SR	4	112.42	21.76	23.27	24.28	0.29	21.64	10.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/06/18	7.00	10:21	5	131.09	26.31	24.07	28.32	0.34	25.24	12.62	3	227.00	81.00	54.00	49.03	0.58	43.71	21.85	0.58
28/06/18	8.00	11:40	6	140.85	6.11	8.71	30.42	0.36	27.12	13.56	4	228.00	94.00	62.00	49.25	0.59	43.90	21.95	0.62
05/07/18	9.00	11:40	7	149.05	22.01	16.80	32.19	0.38	28.70	14.35	5	260.00	77.00	166.00	56.16	0.67	50.06	25.03	0.57
12/07/18	10.00	10:30	8	108.84	9.84	12.81	23.51	0.28	20.96	10.48	6	223.00	92.00	79.00	48.17	0.57	42.94	21.47	0.49
18/07/18	11.00	12:40	9	87.90	17.13	16.83	18.99	0.23	16.92	8.46	7	225.00	122.00	163.00	48.60	0.58	43.32	21.66	0.39
26/07/18	12.00	10:00	-	-	-	-	-	-	-	-	8	252.00	63.00	58.00	54.43	0.65	48.52	24.26	-
02/08/18	13.00	9:45	10	175.28	15.63	13.59	37.86	0.45	33.75	16.87	9	353.00	79.00	74.00	76.25	0.91	67.97	33.98	0.50
09/08/18	14.00	9:30	11	142.29	26.86	29.27	30.73	0.37	27.40	13.70	10	272.00	70.00	89.00	58.75	0.70	52.37	26.18	0.52
16/08/18	15.00	11:09	12	116.01	25.67	14.36	25.06	0.30	22.34	11.17	11	224.00	59.00	58.00	48.38	0.58	43.13	21.56	0.52
29/08/18	17.00	9:48	13	131.23	20.10	30.42	28.35	0.34	25.27	12.63	12	273.00	69.00	64.00	58.97	0.70	52.56	26.28	0.48
05/09/18	18.00	8:46	14	145.67	17.35	13.21	31.46	0.37	28.05	14.02	13	274.00	58.00	57.00	59.18	0.70	52.75	26.38	0.53
12/09/18	19.00	8:50	15	131.09	20.64	17.75	28.32	0.34	25.24	12.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/09/18	20.00	9:00	16	155.65	23.84	20.19	33.62	0.40	29.97	14.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTAS: A-1: Afluente – Etapa N°01; R5%: Reactor 5%; R10%: Reactor 10%; E5%: Efluente del R5%; E10%: Efluente del R10%; CO: Carga Orgánica (gDBO5/d ó gDQO/d); COV: Carga Orgánica Volumétrica (kgDBO5/m³.d ó KgDQO/m³.d); COS: Carga Orgánica Superficial (gDBO5/m².d ó gDQO/m².d). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.10. Registro de mediciones semanales de la DBO5, DQO y cargas contaminantes en la Etapa N°02

Fecha	N° Semana	Hora	N° Dato	DBO5			CO	COV	COS		N° Dato	DQO			CO	COV	COS		DBO5 /DQO
				A-2	E20%	E40%	R20% R40%	R20% R40%	R20% R40%	R40%		A-2	E20%	E40%	R20% R40%	R20% R40%	R20% R40%	R40%	
26/10/18	1	10:47	1	158.91	28.57	18.72	34.32	0.41	7.65	3.82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08/11/18	3	10:52	2	157.62	23.73	11.61	34.05	0.41	7.59	3.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15/11/18	4	11:30	3	158.28	30.05	21.66	34.19	0.41	7.62	3.81	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/11/18	5	10:00	4	115.44	15.89	4.91	24.94	0.30	5.56	2.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13/12/18	8	11:10	5	189.59	54.71	36.49	40.95	0.49	9.13	4.56	1	444.00	218.00	175.00	95.90	1.14	21.37	10.69	0.43
21/12/18	9	9:26	6	147.17	25.98	15.80	31.79	0.38	7.08	3.54	2	346.00	82.00	105.00	74.74	0.89	16.65	8.33	0.43
03/01/19	11	9:37	7	171.91	60.01	31.86	37.13	0.44	8.27	4.14	3	397.00	76.00	121.00	85.75	1.02	19.11	9.55	0.43
09/01/19	12	10:53	8	145.38	3.09	0.02	31.40	0.37	7.00	3.50	4	333.00	75.00	60.00	71.93	0.86	16.03	8.01	0.44
16/01/19	13	9:34	9	166.77	5.40	15.51	36.02	0.43	8.03	4.01	5	365.00	68.00	81.00	78.84	0.94	17.57	8.78	0.46
24/01/19	14	9:35	10	162.01	7.32	32.54	34.99	0.42	7.80	3.90	6	354.00	78.00	120.00	76.46	0.91	17.04	8.52	0.46
30/01/19	15	9:36	11	151.43	50.78	54.37	32.71	0.39	7.29	3.64	7	338.00	133.00	121.00	73.01	0.87	16.27	8.13	0.45
07/02/19	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	341.00	45.00	34.00	73.66	0.88	16.41	8.21	-
14/02/19	17	9:43	12	174.38	6.02	24.49	37.67	0.45	8.39	4.20	9	353.00	50.00	53.00	76.25	0.91	16.99	8.50	0.49
21/02/19	18	9:33	13	192.00	5.57	4.59	41.47	0.49	9.24	4.62	10	350.00	37.00	35.00	75.60	0.90	16.85	8.42	0.55
27/02/19	19	10:41	14	150.35	7.43	1.56	32.48	0.39	7.24	3.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTAS: A-2: Afluente – Etapa N°02; R20%: Reactor 20%; R40%: Reactor 40%; E20%: Efluente del R20%; E40%: Efluente del R40%; CO: Carga Orgánica (gDBO5/d ó gDQO/d); COV: Carga Orgánica Volumétrica (kgDBO5/m³.d ó KgDQO/m³.d); COS: Carga Orgánica Superficial (gDBO5/m².d ó gDQO/m².d). Fuente: Elaboración propia.

9.3 ANEXO N°03: Registro de las mediciones semanales de los Sólidos Suspendidos

Tabla 9.11. Registro de mediciones semanales de los Sólidos suspendidos en la Etapa N°01

Fecha	N° Semana	Hora	N° Dato	A-1 (mg/L)			R5% (mg/L)			R10% (mg/L)			E5% (mg/L)			E10% (mg/L)		
				SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF
31/05/18	4	10:40	1	71.20	14.80	56.40	68.00	11.20	56.80	62.80	10.00	52.80	10.40	1.20	9.20	12.80	0.00	12.80
14/06/18	6	SR	2	60.00	11.00	49.00	113.60	15.60	98.00	128.50	22.50	106.00	15.63	1.50	14.13	16.71	1.14	15.57
22/06/18	7	10:21	3	69.00	11.67	57.33	73.20	9.60	63.60	62.40	6.00	56.40	16.71	0.43	16.29	13.57	0.29	13.29
28/06/18	8	11:40	4	23.14	3.29	19.86	104.80	11.60	93.20	108.80	12.80	96.00	6.50	0.00	6.50	14.88	0.50	14.38
12/07/18	10	10:30	5	35.00	6.25	28.75	61.00	6.50	54.50	55.20	5.60	49.60	16.20	0.20	16.00	12.60	0.00	12.60
18/07/18	11	12:40	6	14.25	2.13	12.12	66.00	12.00	54.00	94.40	18.80	75.60	13.17	2.17	11.00	13.83	2.17	11.67
26/07/18	12	08:35	7	46.00	4.00	42.00	90.80	3.20	87.60	69.60	0.00	69.60	16.60	0.00	16.60	18.00	0.00	18.00
02/08/18	13	09:45	8	99.49	14.36	85.13	138.00	25.00	113.00	122.50	18.00	104.50	5.60	0.70	4.90	7.30	0.30	7.00
09/08/18	14	09:30	9	59.00	10.67	48.33	87.60	13.20	74.40	85.20	15.20	70.00	10.40	0.80	9.60	6.80	0.40	6.40
16/08/18	15	11:09	10	34.83	3.17	31.67	95.20	9.60	85.60	103.60	15.20	88.40	9.10	0.00	9.10	8.30	0.40	7.90
05/09/18	18	08:46	11	73.33	10.00	63.33	106.40	14.80	91.60	139.60	17.60	122.00	11.20	1.60	9.60	9.70	1.70	8.00
12/09/18	19	08:50	12	40.20	7.40	32.80	76.67	12.33	64.33	313.50	45.50	268.00	19.86	2.71	17.14	7.50	1.40	6.10
19/09/18	20	09:00	13	123.33	22.38	100.95	156.50	20.00	136.50	189.00	19.50	169.50	24.29	1.71	22.57	13.22	1.11	12.11

NOTAS: A-1: Afluente – Etapa N°01; R5%: Reactor 5%; R10%: Reactor 10%; E5%: Efluente del R5%; E10%: Efluente del R10%; SST: Sólidos suspendidos totales (mg/L); SSV: Sólidos suspendidos volátiles (mg/L); SSF: Sólidos suspendidos fijos (mg/L); SR: Sin Registro. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.12. Registro de mediciones semanales de los Sólidos suspendidos en la Etapa N°02

Fecha	N° Semana	Hora	N° Dato	A-2 (mg/L)			R20% (mg/L)			R40% (mg/L)			E20% (mg/L)			E40% (mg/L)		
				SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF	SST	SSV	SSF
26/10/18	1	10:47	1	78.72	12.34	66.38	140.00	20.00	120.00	67.50	8.50	59.00	67.50	8.50	59.00	17.00	1.00	16.00
08/11/18	3	10:36	2	97.50	14.50	83.00	124.00	19.33	104.67	107.33	10.00	97.33	12.20	0.00	12.20	13.78	0.44	13.33
15/11/18	4	11:20	3	90.50	13.00	77.50	110.00	14.50	95.50	87.50	8.50	79.00	32.67	1.67	31.00	28.00	0.67	27.33
22/11/18	5	09:20	4	49.20	8.60	40.60	94.00	9.00	85.00	69.60	6.80	62.80	26.67	0.00	26.67	5.70	0.00	5.70
13/12/18	8	10:50	5	108.00	23.50	84.50	152.00	21.33	130.67	155.86	26.21	129.66	109.50	15.50	94.00	83.00	9.50	73.50
21/12/18	9	09:21	6	36.87	7.50	29.37	112.00	16.00	96.00	103.33	14.67	88.67	12.33	2.50	9.83	21.75	2.00	19.75
03/01/19	11	09:30	7	42.20	5.20	37.00	144.76	15.24	129.52	158.46	16.92	141.54	58.50	3.00	55.50	32.00	1.60	30.40
16/01/19	13	09:22	8	35.00	7.20	27.80	91.33	10.00	81.33	123.33	19.33	104.00	1.00	0.00	1.00	2.00	0.00	2.00
24/01/19	14	09:26	9	50.50	6.75	43.75	129.33	8.67	120.67	105.50	7.50	98.00	8.89	0.33	8.56	35.25	3.50	31.75
30/01/19	15	09:40	10	52.50	8.00	44.50	101.00	5.00	96.00	111.00	9.50	101.50	81.50	5.00	76.50	54.33	2.67	51.67
07/02/19	16	14:40	11	42.20	5.40	36.80	133.50	15.00	118.50	200.50	24.50	176.00	6.60	0.30	6.30	1.40	0.00	1.40
14/02/19	17	09:43	12	122.45	15.51	106.94	120.50	8.00	112.50	96.00	15.00	81.00	7.00	0.00	7.00	11.40	2.40	9.00
21/02/19	18	10:38	13	61.00	3.33	57.67	120.50	5.50	115.00	123.00	7.50	115.50	2.50	0.10	2.40	1.90	-	1.90

NOTAS: A-2: Afluente – Etapa N°02; R20%: Reactor 20%; R40%: Reactor 40%; E20%: Efluente del R20%; E40%: Efluente del R40%; SST: Sólidos suspendidos totales (mg/L); SSV: Sólidos suspendidos volátiles (mg/L); SSF: Sólidos suspendidos fijos (mg/L); SR: Sin Registro; Hora: horario del muestreo. Fuente: Elaboración propia.

9.4 ANEXO N°04: Registro de las mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores

Tabla 9.13. Registro de mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores al final de la Etapa N°01

Fecha	N° Dato	N° Semana	Hora	mg/ Portador – R5%			FBA - R5%			mg/ Portador - R10%			FBA - R10%		
				mgSST/ portador	mgSSV/ portador	mgSSF/ portador	gSST/ m ²	gSSV/ m ²	gSSF/ m ²	SST/ portador	SSV/ portador	SSF/ portador	gSST/ m ²	gSSV/ m ²	gSSF/ m ²
09/10/18	1	23	10:19	175.50	87.50	88.00	22.37	11.15	11.22	200.00	87.33	112.67	25.49	11.13	14.36
09/10/18	2	23	10:29	243.33	128.67	114.67	31.02	16.40	14.62	195.33	86.00	109.33	24.90	10.96	13.94
09/10/18	3	23	10:25	248.67	115.33	133.33	31.70	14.70	17.00	217.33	122.67	94.67	27.70	15.64	12.07
09/10/18	4	23	10:33	240.00	124.67	115.33	30.59	15.89	14.70	162.67	81.33	81.33	20.73	10.37	10.37
09/10/18	5	23	10:36	213.33	106.00	107.33	27.19	13.51	13.68	233.33	110.67	122.67	29.74	14.11	15.64
09/10/18	6	23	10:40	233.33	118.67	114.67	29.74	15.13	14.62	217.33	98.00	119.33	27.70	12.49	15.21
09/10/18	7	23	10:44	239.33	119.33	120.00	30.51	15.21	15.30	231.33	104.00	127.33	29.49	13.26	16.23
09/10/18	8	23	16:40	270.00	130.67	139.33	34.42	16.66	17.76	236.00	117.33	118.67	30.08	14.96	15.13
09/10/18	9	23	16:51	250.00	121.33	128.67	31.87	15.47	16.40	228.67	109.33	119.33	29.15	13.94	15.21
09/10/18	10	23	16:55	254.00	121.33	132.67	32.38	15.47	16.91	274.00	127.33	146.67	34.93	16.23	18.69
11/10/18	11	23	14:03	185.33	101.33	84.00	23.62	12.92	10.71	272.67	123.33	149.33	34.76	15.72	19.03
11/10/18	12	23	14:03	126.00	44.00	82.00	16.06	5.61	10.45	232.00	97.33	134.67	29.57	12.41	17.17
11/10/18	13	23	14:03	198.00	99.33	98.67	25.24	12.66	12.58	260.00	108.00	152.00	33.14	13.77	19.37
11/10/18	14	23	14:03	193.33	89.33	104.00	24.64	11.39	13.26	250.67	103.33	147.33	31.95	13.17	18.78
11/10/18	15	23	14:03	136.00	50.67	85.33	17.34	6.46	10.88	247.33	115.33	132.00	31.53	14.70	16.83
11/10/18	16	23	14:03	140.67	54.00	86.67	17.93	6.88	11.05	250.00	120.00	130.00	31.87	15.30	16.57

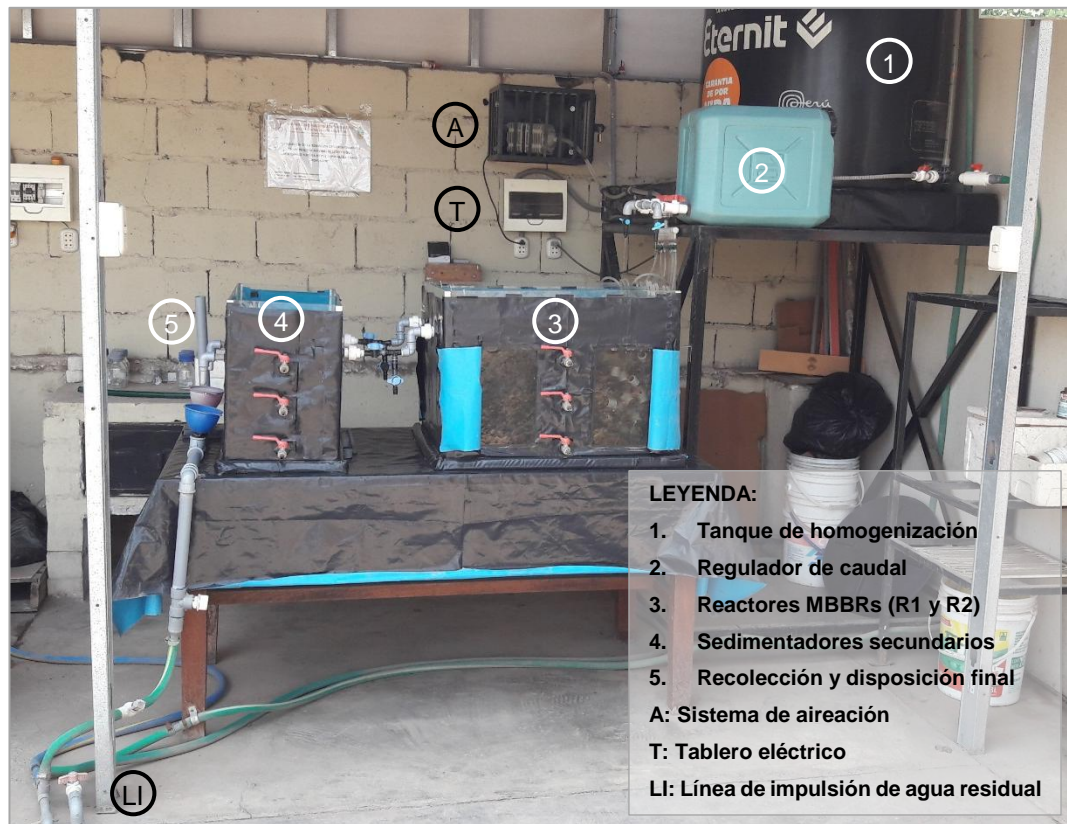
NOTAS: FBA: Índice de formación de biomasa adherida; R5%: Reactor 5%; R10%: Reactor 10%; SST: Sólidos suspendidos totales; SSV: Sólidos suspendidos volátiles; SSF: Sólidos suspendidos fijos; Hora: horario del muestreo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.14. Registro de mediciones de los Sólidos adheridos en los portadores al final de la Etapa N°02

Fecha	N° Dato	N° Semana	Hora	mg/ Portador – R20%			FBA – R20%			mg/ Portador – R40%			FBA – R40%		
				mgSST/ portador	mgSSV/ portador	mgSSF/ portador	gSST/ m ²	gSSV/ m ²	gSSF/ m ²	SST/ portador	SSV/ portador	SSF/ portador	gSST/ m ²	gSSV/ m ²	gSSF/ m ²
07/03/19	1	20	12:43	265.00	91.67	173.33	408.75	282.50	126.25	53.00	18.33	34.67	81.75	56.50	25.25
07/03/19	2	20	12:43	163.33	52.22	111.11	355.00	223.75	131.25	32.67	10.44	22.22	71.00	44.75	26.25
07/03/19	3	20	12:43	214.29	86.90	127.38	297.50	171.25	126.25	42.86	17.38	25.48	59.50	34.25	25.25
07/03/19	4	20	12:43	147.27	59.09	88.18	323.75	198.75	125.00	29.45	11.82	17.64	64.75	39.75	25.00
07/03/19	5	20	12:43	327.14	140.00	187.14	326.25	202.50	123.75	65.43	28.00	37.43	65.25	40.50	24.75
07/03/19	6	20	12:43	305.00	128.33	176.67	517.50	358.75	158.75	61.00	25.67	35.33	103.50	71.75	31.75
07/03/19	7	20	12:43	202.78	75.00	127.78	490.00	355.00	135.00	40.56	15.00	25.56	98.00	71.00	27.00
07/03/19	8	20	12:43	215.71	74.29	141.43	413.75	303.75	110.00	43.14	14.86	28.29	82.75	60.75	22.00
07/03/19	9	20	12:43	230.00	82.86	147.14	432.50	310.00	122.50	46.00	16.57	29.43	86.50	62.00	24.50
07/03/19	10	20	12:43	301.67	116.67	185.00	387.50	261.25	126.25	60.33	23.33	37.00	77.50	52.25	25.25
07/03/19	11	20	12:43	271.67	116.67	155.00	118.75	50.00	68.75	54.33	23.33	31.00	23.75	10.00	13.75
07/03/19	12	20	12:43	257.14	108.57	148.57	110.00	45.00	65.00	51.43	21.71	29.71	22.00	9.00	13.00
07/03/19	13	20	12:43	230.00	90.00	140.00	131.25	62.50	68.75	46.00	18.00	28.00	26.25	12.50	13.75
07/03/19	14	20	12:43	187.14	72.86	114.29	158.75	78.75	80.00	37.43	14.57	22.86	31.75	15.75	16.00
07/03/19	15	20	12:43	296.67	123.33	173.33	128.75	50.00	78.75	59.33	24.67	34.67	25.75	10.00	15.75
07/03/19	16	20	12:43	230.00	86.67	143.33	127.50	53.75	73.75	46.00	17.33	28.67	25.50	10.75	14.75
07/03/19	17	20	12:43	230.00	82.86	147.14	130.00	57.50	72.50	46.00	16.57	29.43	26.00	11.50	14.50

NOTAS: FBA: Índice de formación de biomasa adherida; R20%: Reactor 20%; R40%: Reactor 40%; SST: Sólidos suspendidos totales; SSV: Sólidos suspendidos volátiles; SSF: Sólidos suspendidos fijos; Hora: horario del muestreo. Fuente: Elaboración propia.

9.5 ANEXO N°05: Panel fotográfico



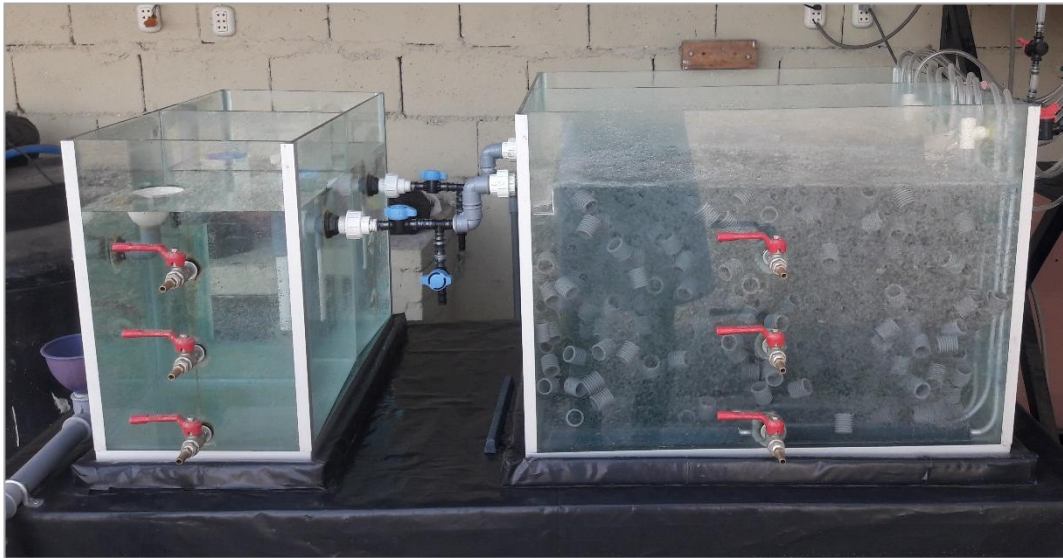
Fotografía 9.1. Vista frontal de la Unidad de Investigación



Fotografía 9.2. MBBRs y sedimentadores secundarios experimentales implementados para la investigación – Vista de perfil



Fotografía 9.3. Vista lateral de la Unidad de Investigación



Fotografía 9.4. MBBRs y sedimentadores secundarios experimentales implementados para la investigación – Vista frontal



Fotografía 9.5. MBBRs experimentales en funcionamiento (derecha: R5%; izquierda: R10%) - Final de etapa N°01



Fotografía 9.6. Sedimentadores secundarios experimentales en funcionamiento (derecha: E5%; izquierda: E10%) - Final de etapa N°01



Fotografía 9.7. MBBRs experimentales en funcionamiento (abajo: R20%; arriba: R40%) - Final de etapa N°02



Fotografía 9.8. Sedimentadores secundarios experimentales en funcionamiento (abajo: E20%; arriba: E40%) - Final de etapa N°02



Fotografía 9.9. Unidad de investigación y tesista.