



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

**INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA**

**EVALUACIÓN DEL PRODUCTO PB8055 (SUPLEMENTO  
NUTRICIONAL) EN UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTA:**

**BRENDA ORIHUELA MARTINEZ**

**DIRECTOR:**

**M. EN I. LUCIANO SANDOVAL YOVAL**

## **i. AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Maestro Luciano Sandoval por su paciencia, ayuda y enseñanza.

## **i. DEDICATORIAS**

Este trabajo de investigación se lo dedico a:

Mis padres, por ser mi pilar en toda esta trayectoria, por enseñarme a crecer, a valorar y agradecer por cada cosa que tengo en la vida.

A tíos, Inés y Lupe por su apoyo y cariño incondicional motivándome siempre a cumplir mis metas.

A mis amigos que me acompañaron en cada día de universidad y aunque el camino no fue fácil, siempre me llenaban de alegría.

A mis compañeros y amigos del IMTA, con quienes aprendí y compartí lo aprendido.

A mí, porque solo yo puedo saber cuánto esfuerzo costó llegar hasta este punto de mi vida.

# Índice

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIAS.....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2 ANTECEDENTES Y MARCO TEORICO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Fundamentos generales.....	5
2.1.1 Aguas residuales .....	5
2.1.2 Las aguas residuales municipales.....	6
2.1.3 Las aguas residuales industriales .....	6
2.1.4 Las aguas residuales agrícolas.....	6
2.2 Microbiología .....	7
2.2.1 Bacterias.....	7
2.2.2 Protozoarios .....	8
2.2.3 Rotíferos.....	9
2.3 Estabilización de materia orgánica .....	10
2.4 Procesos de tratamiento.....	11
2.4.1 Tratamiento de aguas residuales .....	11
2.4.2 Tratamiento primario.....	12
2.4.3 Tratamiento secundario de aguas residuales .....	13
2.4.4 Tratamiento terciario de aguas residuales .....	14
2.4.5 Uso del carbono como suplemento .....	16
2.4.6 Tratamiento aerobio .....	18
2.4.7 Tratamiento anaerobio .....	19

2.5	Eliminación biológica de nutrientes.....	20
2.5.1	Nitrificación.....	20
2.5.2	Desnitrificación.....	21
2.5.3	Oxidación Biológica.....	22
2.5.4	Eliminación biológica del carbono.....	23
2.5.5	Eliminación biológica de nitrógeno.....	24
2.5.6	Eliminación biológica de fosforo.....	26
2.6	Parámetros de calidad del agua.....	27
2.6.1	Demanda química de oxígeno (DQO).....	27
2.6.2	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	27
2.6.3	Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Nitrógeno total (NT).....	28
2.6.4	Nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ).....	29
2.6.5	Fosforo total (PT).....	29
2.6.6	Sólidos suspendidos totales (SST).....	30
2.6.7	Sólidos disueltos totales (SDT).....	30
2.6.8	Sólidos sedimentables.....	30
2.7	Parámetros operacionales.....	31
2.7.1	Índice volumétrico de lodos (IVL).....	31
2.7.2	Control del gasto de recirculación.....	32
2.7.3	Relación alimento/microorganismos (A/M).....	32
2.7.4	Tiempo medio de retención celular (TMRC).....	35
2.8	Factores limitantes en el crecimiento de los microorganismos.....	36
2.8.1	Temperatura.....	36
2.8.2	Oxígeno disuelto (OD).....	37
2.8.3	pH.....	37
2.9	Proceso de lodos activados.....	38

2.9.1	Generalidades de Operación del proceso.....	38
2.9.2	Modalidad Ludzack-Ettinger .....	48
2.9.3	Modalidad Ludzack-Ettinger Modificado .....	49
<b>3</b>	<b>JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>52</b>
4.1	General.....	52
4.2	Específicos.....	52
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>53</b>
5.1	Selección de suplemento nutricional.....	53
5.2	Configuración experimental.....	54
5.3	Acondicionamiento del prototipo.....	57
5.4	Arranque y estabilización.....	58
5.5	Monitoreo y control.....	59
5.5.1	Procedimientos para determinaciones analíticas.....	59
5.5.2	Puntos de monitoreo .....	63
5.6	Análisis de resultados .....	63
5.7	Diagrama metodológico.....	63
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
6.1	Análisis de parámetros de control .....	65
6.1.1	Oxígeno Disuelto (OD).....	65
6.1.2	pH.....	67
6.1.3	Temperatura (T) .....	68
6.1.4	Sólidos Suspendidos Totales (SST) .....	69
6.1.5	Índice Volumétrico de Lodos (IVL) .....	71
6.1.6	Purga de lodos.....	72
6.2	Análisis de las determinaciones analíticas.....	73

6.2.1	Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	73
6.2.2	Remoción de Fosforo Total (PT).....	76
6.2.3	Remoción de Nitrógeno Total (NT) .....	79
6.2.4	Remoción de Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> ).....	81
6.2.5	Remoción de Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	84
6.2.6	Remoción de Solidos Suspendidos Totales (SST) .....	87
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>97</b>
9.1	Anexo 1 Hoja técnica del producto PB8055 por la empresa ChemTreat.....	97
9.2	Anexo 2 Limites permisibles NOM-001-SEMARNAT-2021.....	99
9.3	Anexo 3 Tablas de datos de parámetros de control .....	100

## Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 2-1. VISTA MICROSCÓPICA DE LODOS ACTIVADOS PTAR IMTA .....	7
ILUSTRACIÓN 2-2. LAS BACTERIAS SON LOS MICROORGANISMOS QUE EN MAYOR PROPORCIÓN CONSTITUYEN LA BIOMASA DE LOS LODOS ACTIVADOS (95%).....	8
ILUSTRACIÓN 2-3. PROTOZOARIOS DE AGUA ESTANCADA .....	9
ILUSTRACIÓN 2-4. ROTÍFERO: SON INVERTEBRADOS CON UNA LONGITUD DEL CUERPO ENTRE 0.03 Y 2 MM .....	10
ILUSTRACIÓN 2-5. PTAR IMTA .....	12
ILUSTRACIÓN 2-6. REACTOR AEROBIO DE PTAR GACHUPINA, JIUTEPEC .....	18
ILUSTRACIÓN 5-1 SUPLEMENTO DE MATERIA CARBONÁCEA PRODUCTO PB8055 .....	53
ILUSTRACIÓN 5-2. REALIZACIÓN DE ANÁLISIS .....	62

## Índice de figuras

FIGURA 2-1. ESTABILIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA.....	10
FIGURA 5-1. VISTA FRONTAL DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS EN SU MODALIDAD LUDZACK-ETTINGER.....	55
FIGURA 5-2. VISTA DE PLANTA DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS EN SU MODALIDAD LUDZACK-ETTINGER.....	55
FIGURA 5-3. VISTA FRONTAL DEL PROTOTIPO DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS MODALIDAD LUDZACK-ETTINGER CONVENCIONAL .....	56
FIGURA 5-4. VISTA FRONTAL DEL CLARIFICADOR UTILIZADO PARA EL PROTOTIPO DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS MODALIDAD LUDZACK-ETTINGER .....	56
FIGURA 5-5. MEZCLADOR DENTRO DEL REACTOR DE ANOXIA Y DIFUSORES EMPLEADOS EN EL REACTOR AEROBIO .....	57
FIGURA 5-6. VISTA FRONTAL DEL PROTOTIPO LODOS ACTIVADOS DESPUÉS DEL ARRANQUE .....	57
FIGURA 5-7. ACONDICIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	58
FIGURA 5-8. PUNTOS DE MONITOREO .....	63

## Índice de Tablas

TABLA 2.1. TIPOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	15
TABLA 2.2. POBLACIONES DE MICROORGANISMOS EN DIFERENTES TIPOS DE FUENTES DE CARBONO .....	17



TABLA 2.3. CLASIFICACION DE LOS MICROORGANISMOS DEPENDIENDO DE LA CONDICION EN LA QUE SE ENCUENTREN .....	20
TABLA 2.4. COMPARACION ENTRE DBO Y DQO.....	28
TABLA 2.5. TIPOS DE SÓLIDOS PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES .....	30
TABLA 5.1. COMPONENTES DEL PRODUCTO PB8055.....	54
TABLA 5.2. PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS DEL PRODUCTO PB8055.....	54
TABLA 5.3 DETERMINACIONES ANALÍTICAS AL AGUA DE ENTRADA Y SALIDA.....	59
TABLA 5.4 PARÁMETROS DE CONTROL REACTOR ANÓXICO Y AEROBIO .....	59
TABLA 6.1. PURGAS REALIZADAS EN EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS.....	72
TABLA 6.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA DQO .....	73
TABLA 6.3. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE PT.....	76
TABLA 6.4. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE NT .....	79
TABLA 6.5. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE NITRÓGENO AMONICAL.....	81
TABLA 6.6. RESULTADOS DE ANÁLISIS PARA NITRATOS.....	84
TABLA 6.7. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SST .....	87

## Índice de Gráficas

GRÁFICA 2-1. RELACIÓN TEMPERATURA-ACTIVIDAD MICROBIANA .....	37
GRÁFICA 6-1. OXÍGENO DISUELTO EN EL REACTOR BIOLÓGICO .....	66
GRÁFICA 6-2. PH EN EL REACTOR BIOLÓGICO .....	68
GRÁFICA 6-3. TEMPERATURA EN EL REACTOR BIOLÓGICO .....	69
GRÁFICA 6-4. SST DEL REACTOR BIOLÓGICO .....	70
GRÁFICA 6-5. IVL DEL REACTOR BIOLÓGICO.....	71
GRÁFICA 6-6. LÍMITE DE SST .....	73
GRÁFICA 6-7. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE DQO .....	74
GRÁFICA 6-8. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO .....	75
GRÁFICA 6-9. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DQO .....	76
GRÁFICA 6-10. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE PARA PT .....	77
GRÁFICA 6-11. EFICIENCIA DE REMOCIÓN PT .....	78
GRÁFICA 6-12. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE PT .....	78
GRÁFICA 6-13. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE PARA NT .....	80
GRÁFICA 6-14. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NT.....	80
GRÁFICA 6-15. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE NT .....	81
GRÁFICA 6-16. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE PARA N-NH <sub>3</sub> .....	82
GRÁFICA 6-17. EFICIENCIA DE REMOCIÓN N-NH <sub>3</sub> .....	83

GRÁFICA 6-18. LÍMITE ESTABLECIDO DE N-NH <sub>3</sub> .....	83
GRÁFICA 6-19. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE PARA NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	85
GRÁFICA 6-20. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	85
GRÁFICA 6-21. LÍMITE PARA NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	86
GRÁFICA 6-22. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> Y N-NH <sub>3</sub> EN EL INFLUENTE .....	87
GRÁFICA 6-23. TENDENCIA DEL INFLUENTE Y EFLUENTE PARA SST .....	88
GRÁFICA 6-24. EFICIENCIA DE REMOCIÓN SST .....	89
GRÁFICA 6-25. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE SST.....	89

## Índice de Diagramas

DIAGRAMA 2-1. PROCESO CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS .....	41
DIAGRAMA 2-2. AERACIÓN EXTENDIDA FACILITA LA DIGESTIÓN AEROBIA DE LOS MICROORGANISMOS DENTRO DEL SISTEMA .....	41
DIAGRAMA 2-3. ZANJAS DE OXIDACIÓN TIENEN UNA CONFIGURACIÓN DE ANILLO, ÓVALO O TANQUE EN FORMA DE HERRADURA CON UNO O VARIOS CANALES.....	42
DIAGRAMA 2-4. REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL PUEDEN COMBINAR EN UN MISMO TANQUE TODAS O PARTES DE LAS FASES DEL TRATAMIENTO .....	43
DIAGRAMA 2-5. BIRREACTOR CON MEMBRANAS SUMERGIDAS, LA DEGRADACIÓN BIOLÓGICA Y LA SEPARACIÓN POR MEMBRANA OCURREN SIMULTÁNEAMENTE .....	43
DIAGRAMA 2-6. MEZCLA COMPLETA AL EXISTIR UNA HOMOGENEIDAD DENTRO DEL TANQUE, ESTA FACILITA LAS REACCIONES.....	44
DIAGRAMA 2-7. AERACIÓN DECRECIENTE, AL INICIO DEL PROCESO SE NECESITA MAYOR CANTIDAD DE AIRE PARA ESTABILIZAR LA MATERIA ORGANICA .....	45
DIAGRAMA 2-8. ESTABILIZACIÓN CONTACTO HAY UN BREVE PERIODO DE CONTACTO ENTRE EL AGUA RESIDUAL Y EL LODO PARA LA ELIMINACIÓN MÁS RÁPIDA DE DBO <sub>5</sub> .....	46
DIAGRAMA 2-9. SISTEMA DE OXÍGENO PURO SE UTILIZA EN UN TANQUE DE AERACIÓN CERRADO .....	46
DIAGRAMA 2-10. PROCESO ORBAL ES IDÓNEO PARA PROCESOS DE NITRIFICACIÓN-DESNITRIFICACIÓN .....	48
DIAGRAMA 2-11. PROCESO CONVENCIONAL DE LUDZACK-ETTINGER.....	48
DIAGRAMA 2-12. PROCESO MODIFICADO DE LUDZACK-ETTINGER .....	50
DIAGRAMA 5-1. DIAGRAMA METODOLÓGICO.....	64

## RESUMEN

Muchas de las veces un agua residual de origen industrial contiene una cantidad baja de materia orgánica, por lo que, cuando va a ser tratada por un proceso biológico no se cuenta con los requerimientos de carbono que necesitan los microorganismos para realizar su síntesis celular, en estos casos es necesario adicionar un suplemento que contenga carbono. Los suplementos más conocidos, estudiados o probados son metanol, sacarosa, acetato o glicerina.

En este sentido, el presente estudio evalúa el impacto que tiene la adición de una fuente de carbono, que contiene un 60% de glicerina (producto comercial PB8055) en el tratamiento biológico de un agua residual débil en materia orgánica.

El tratamiento que se empleó fue el de lodos activados convencional en su modalidad Ludzack-Ettinger, y en éste se evaluó el efecto que tiene el suplemento PB8055 sobre los microorganismos, al determinar un aumento o disminución de los sólidos suspendidos totales en el reactor biológico y mediante la remoción de la Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno y Fósforo total. Así mismo, se evaluó si existió un efecto positivo o negativo en los procesos de nitrificación y desnitrificación, por lo cual, se determinó el nitrógeno amoniacal y los nitratos en el influente y efluente del proceso de tratamiento.

Las condiciones de operación que se emplearon fueron; caudal de 100 mL/min con un tiempo de residencia hidráulico de 6.84 h y recirculación de lodos al 100%. La aportación de materia orgánica al agua residual, como Demanda Química de Oxígeno, que proporciona el suplemento PB8055, fue de 223 mg/L. Bajo estas condiciones se obtuvo que la Demanda Química de Oxígeno promedio del influente fue de 335 mg/L.

Las eficiencias de remoción que se obtuvieron fueron de: 85.37% para Demanda Química de Oxígeno, 78.47% en Fosforo Total, 73.68% de Nitrógeno Total, 81.24% en Nitrógeno Amoniacal, y 90.51% de Sólidos Suspendidos Totales. Por lo que, la calidad del agua tratada cumple con la **NOM-001-SEMARNAT-2021**.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la glicerina al 60% (PB8055), es un excelente suplemento de materia carbonácea, ya que se obtuvo un efecto positivo sobre el metabolismo de los microorganismos, debido a que el proceso de tratamiento de lodos activados convencional en su modalidad Ludzack-Ettinger, realizó eficientemente los procesos de eliminación de materia orgánica, de nitrificación y de desnitrificación.

# 1 INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para vivir y desempeña un papel vital en el funcionamiento adecuado de los ecosistemas de la Tierra. La contaminación del agua tiene un impacto serio en todos los seres vivos y podría afectar adversamente el uso del agua potable en el hogar, y otras actividades como la industria, la agricultura, la pesca, el transporte y el comercio.

En México la Ley de Aguas Nacionales, regula el aprovechamiento, la distribución, control y preservación de las aguas. A su vez, existen diversas Normas tales como:

-NOM-001-SEMARNAT-2021. la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, esto con la finalidad de garantizar una reducción en la contaminación de los cuerpos de aguas superficiales.

-NOM-002-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

-NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Que complementan a la Ley, y que sirven como partes reguladoras de las descargas de aguas residuales a los bienes de la nación. La entidad que ve que se cumpla esta ley es la Comisión Nacional del Agua.

El proceso de tratamiento de aguas residuales consiste en la separación o eliminación de la carga de materia orgánica y nutrientes presentes en las aguas residuales proveniente de diferentes actividades humanas, logrando la eliminación al máximo de residuos y contaminantes.

En el tratamiento de aguas residuales industriales es necesaria la implementación de procesos capaces de remediar el influente contaminado por la influencia de

compuestos inorgánicos y orgánicos que son utilizados para la fabricación de diversos productos, es por ello, que se busca, que una combinación de los procesos biológicos, químicos o físicos proporcione que el efluente de una planta tratadora cumpla con los parámetros de calidad del agua establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El tratamiento de aguas residuales por el sistema de lodos activados en México se inició en los años cincuenta, con el objetivo de sanear las aguas residuales y minimizar el impacto de éstas al ser vertidas a los cuerpos de agua superficiales. Pero, también se optó por su aprovechamiento para su reúso en riego agrícola y de áreas verdes, llenado de lagos y procesos industriales. Así fue como se construyeron las primeras plantas de este tipo en Monterrey, Nuevo León, y en la Cd. de México. La alta eficiencia del proceso, así como la posibilidad de modificarlo, ya sea para la estabilización de materia carbonácea y la remoción de nutrientes, hacen atractivo el empleo de este proceso para obtener aguas residuales tratadas que deban cumplir con los requerimientos que establece la normatividad actual.

Cuando se implementa en una planta tratadora de aguas residuales industriales un proceso biológico, como lo es el de lodos activados, esto se complica, debido a que muchas de las veces el agua residual no contiene los requerimientos de carbono, nitrógeno y fósforo, necesarios para que los microorganismos realicen sus funciones metabólicas, así como para su reproducción (Knowles R, 1982).

Por lo anterior en el mercado existe una gran diversidad de productos que contienen fuentes de carbono, tales como glicerina, metanol, etanol, glucosa y acetato.

## **2 ANTECEDENTES Y MARCO TEORICO**

### **2.1 Fundamentos generales**

#### **2.1.1 Aguas residuales**

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, las aguas residuales se definen como: las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquiera otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT, 1997).

Un producto inevitable de las actividades humanas diarias es la generación de residuos tanto sólidos como líquidos, en donde la fracción líquida (agua residual) es esencialmente el agua que deshecha una comunidad una vez que ya se ha sido contaminada durante sus diferentes usos (Metcalf&Eddy, 2003).

Cuando se llega a producir una acumulación de agua residual estancada, la carga de materia orgánica contenida entra en descomposición generando así una gran cantidad de gases con malos olores, el agua residual contiene grandes cantidades de microorganismos patógenos, causantes de enfermedades en el aparato intestinal del ser humano también contiene compuestos tóxicos y nutrientes que generan la producción de algunas plantas acuáticas es por estas razones que no se debe producir una acumulación del agua residual sino de debe ser desechada de manera inmediata desde sus fuentes de generación para un tratamiento adecuado.

Las características de las aguas residuales dependen de todos los componentes que las conforman, el flujo de agua residual y los cambios que puedan ocurrir dentro del sistema de recolección.

### **2.1.2 Las aguas residuales municipales**

El término aguas residuales municipales se refiere en forma general a los diferentes tipos de agua residuales que se encuentran en los sistemas públicos de alcantarillado de ciudades y poblados, y son aquellas que se producen en todas las viviendas.

Estas aguas residuales presentan características de un líquido turbio, de color gris o amarillento, con olor séptico, en el cual van suspendidas partículas de sedimentos, heces, residuos vegetales, tiras de papel y materiales sintéticos. Cuanto más largo sea el colector y más turbulento el flujo, más pequeñas serán las partículas presentes en el agua residual (Fresenius & Scheider, 1991).

### **2.1.3 Las aguas residuales industriales**

Son todas las aguas que salen de los procesos de producción dentro de las diferentes empresas. El agua que se desecha desde las fábricas, a las plantas de producción energética o cualquier otra actividad que esté destinada a la fabricación de productos consumibles o productos manufactureros.

Las aguas industriales, una vez que han cumplido su función en la producción, se convierten en aguas residuales industriales contaminadas. Los contaminantes presentes en las aguas industriales difieren enormemente en función de la industria de la que proceden las aguas residuales industriales (Fresenius & Scheider, 1991).

### **2.1.4 Las aguas residuales agrícolas**

Se caracterizan por la presencia de plaguicidas, sales y un alto contenido de sólidos en suspensión, se refieren también a todos aquellos recursos hídricos que se usan para cultivar productos de la tierra y mantener el ganado .



## 2.2 Microbiología

Las aguas naturales contienen una amplia variedad de microorganismos, los cuales forman un sistema ecológico balanceado. Las características biológicas de éste se relacionan principalmente con la población residente en microorganismos y su impacto directo en la calidad del agua. Por esta razón, es necesario conocer los principios básicos de la microbiología.

Los microorganismos que se encuentran en las aguas residuales sin tratar incluyen bacterias, hongos, algas, protozoos, helmintos, virus y otras plantas y animales microscópicos. La principal fuente de estos organismos son los desechos humanos. Otras fuentes incluyen actividades comerciales e industriales (Moeller, y otros, 2011).

Las aguas residuales son un medio de cultivo ideal para el crecimiento de un gran número de microorganismos, los cuales juegan un papel importante dentro de todas las etapas del tratamiento biológico de las aguas residuales. En la Ilustración 2-1 se observan algunos de los microorganismos presentes en los lodos activados.



**Ilustración 2-1. Vista microscópica de lodos activados PTAR IMTA**

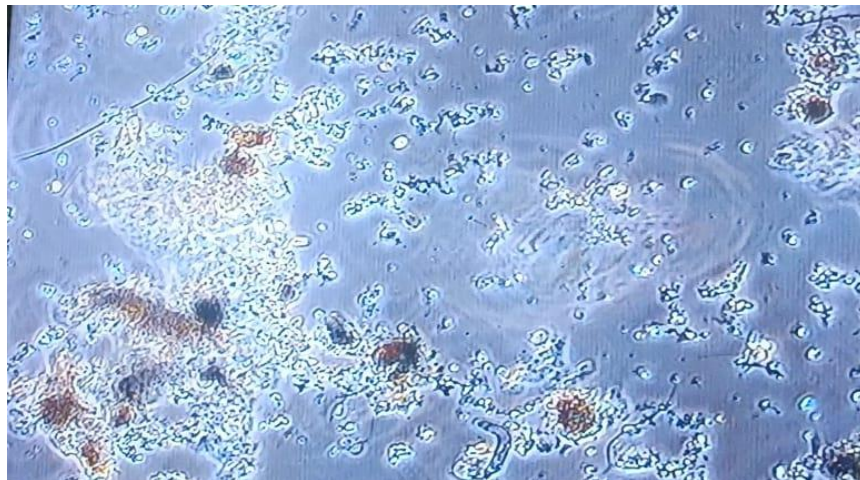
### 2.2.1 Bacterias

Las bacterias son organismos unicelulares pertenecientes al reino monera que pueden vivir como autótrofos o heterótrofos y aprovechar el alimento soluble (Ilustración 2-2). Algunas bacterias forman esporas resistentes que pueden permanecer latentes por

periodos prolongados en condiciones ambientales adversas pero que pueden reactivarse al retornar las condiciones favorables.

La mayoría de las bacterias se desarrollan en condiciones neutras, aunque algunas especies pueden existir en un ambiente altamente ácido. Las bacterias desempeñan una función vital en los procesos naturales de estabilización y se utilizan ampliamente en el tratamiento de aguas residuales (Moeller, y otros, 2011). Se conocen alrededor de 1,500 especies que se clasifican con criterios tales como:

- Tamaño, forma y agrupamiento de células características de la colonia
- Reacción a la tinción
- Requerimientos de crecimiento
- Movilidad y reacciones químicas específicas
- Se encuentran en formas aerobias, anaerobias y facultativas



**Ilustración 2-2. Las bacterias son los microorganismos que en mayor proporción constituyen la biomasa de los lodos activados (95%)**

### **2.2.2 Protozoarios**

Los protozoarios son microorganismos eucariontes unicelulares de 10 a 100  $\mu\text{m}$  de longitud que se reproducen por fisión binaria (Ilustración 2-3). Algunos protozoarios se encuentran libres en la naturaleza, mientras que otros son parásitos, viviendo dentro o fuera de un organismo. Los huéspedes varían de organismos primitivos como las algas a organismos complejos, incluyendo al ser humano.

La mayoría son heterótrofos aerobios o anaerobios facultativos. Su fuente principal de alimento son las células bacterianas; sin embargo, no pueden sintetizar todos los factores necesarios para su crecimiento y dependen de las bacterias para que los suministren. Los protozoarios abundantes en el suelo y agua tienen una participación importante en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Moeller, y otros, 2011).



**Ilustración 2-3. Protozoarios de agua estancada**

### **2.2.3 Rotíferos**

Los rotíferos son animales eucariotas heterótrofos aeróbicos. El nombre se deriva del hecho de que tienen dos conjuntos de cilios giratorios en la cabeza que se utilizan para la movilidad y la captura de alimentos (Ilustración 2-4). Son muy efectivos para consumir bacterias dispersas, floculantes y pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica aerobia altamente eficiente (Metcalf & Eddy, 2014).

Realizan importantes funciones benéficas en la estabilización de desechos orgánicos. Estimulan la actividad y descomposición de la microflora, ayudan a la penetración de oxígeno y a la recirculación de nutrientes minerales. Se encuentran, pocas veces en gran número en procesos de tratamiento de agua. Solamente en sistemas de aeración extendida son la forma animal predominante (CONAGUA, 2019).

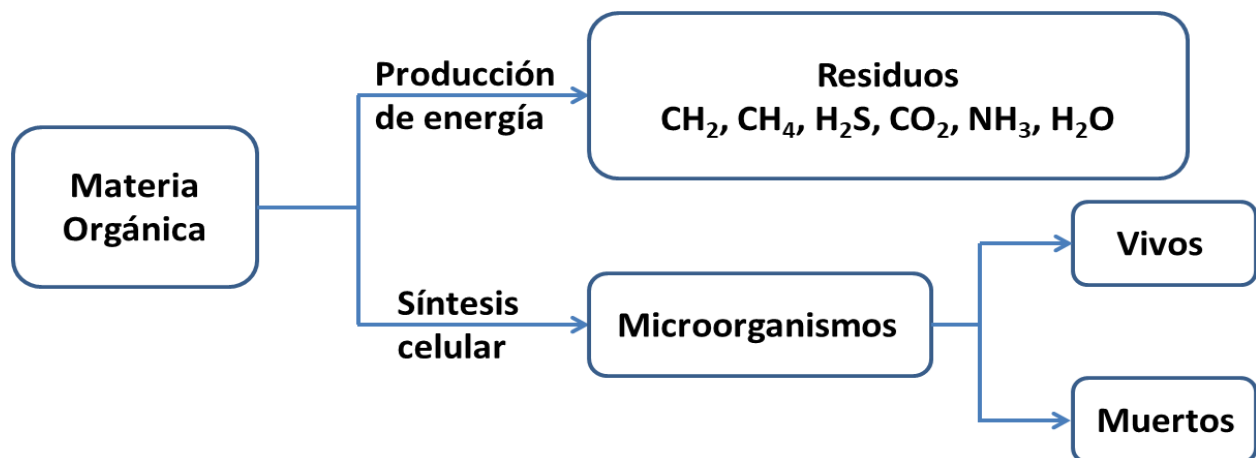


**Ilustración 2-4. Rotífero: son invertebrados con una longitud del cuerpo entre 0.03 y 2 mm**

### **2.3 Estabilización de materia orgánica**

En los procesos biológicos, la materia orgánica contaminante es utilizada como alimento por los microorganismos presentes en los tanques o reactores. De esta manera pueden obtener la energía necesaria, y la materia orgánica es transformada en nuevas células y otros productos que pueden ser más fácilmente separados del agua (Figura 2-1).

Entre los procesos aerobios el más usado es el de lodos activados, esto debido a que los microorganismos son activados por oxígeno, por lo que son capaces de estabilizar la materia orgánica presente en las aguas residuales, ya que esta les sirve de alimento.



**Figura 2-1. Estabilización de la materia orgánica**

Se puede decir técnicamente que el proceso de tratamiento por lodos activados se ha estabilizado cuando las concentraciones de los parámetros monitoreados, tales como demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales entre otros en el agua residual tratada, sea igual o menor a la calidad del agua establecida en los lineamientos de diseño.

En general las bacterias aerobias emplearán en presencia de oxígeno, de un 60% a 65% de la energía del sustrato para la síntesis de nuevas células, mientras que la fracción restante es disipada en forma de calor.

## **2.4 Procesos de tratamiento**

### **2.4.1 Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de aguas consiste en una serie de procesos para eliminar o reducir las impurezas existentes en el agua y hacer que la calidad del agua tratada sea adecuada para el propósito al que fue destinada. Todos los componentes que se encuentran en las aguas residuales se eliminan por medios físicos, químicos y biológicos. En la Ilustración 2-5 se aprecia una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados.

El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, bien directamente o pasando por una neutralización u homogeneización. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales los que se encargan de la estabilización de la materia orgánica. En cuanto al tratamiento terciario su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales tales como los coliformes fecales y virus. (Ramalho, 2004).





**Ilustración 2-5. PTAR IMTA**

### **2.4.2 Tratamiento primario**

El principal objetivo del tratamiento primario de las aguas residuales es lograr la reducción por completo de los sólidos en suspensión, es decir, los sólidos flotantes y sedimentables.

- **Sólidos flotantes:** Estos presentan menor densidad, por lo que de manera natural cuando el agua residual se encuentra en reposo. Son eliminados mediante una serie de rasquetas que arrastran las partículas flotantes.
- **Sólidos sedimentables:** Estos presentan una mayor densidad por lo que precipitan en el fondo del decantador por acción de la gravedad. Son retirados periódicamente y pueden ser utilizados como abono para la agricultura.

En plantas de tratamiento de aguas residuales las variaciones de caudal son considerables, ya que los valores máximos y promedio además de la carga orgánica contaminante hacen indispensable el uso de tanques reguladores. La regulación u homogenización amortigua las variaciones de caudal de manera que se alcance un caudal de salida constante.

- **Tanque de regulación:** Su función es eliminar las variaciones del flujo o caudal para lograr que este se mantenga constante. Esto se aplica principalmente en caudales en tiempo seco, lluvias y mixtos.
- **Tanque de homogenización:** se usa para corregir la alcalinidad o acidez del pH del agua residual añadiendo ácidos o bases al agua residual, ya que un pH demasiado alto o bajo que puede dificultar la acción de los microorganismos del tratamiento biológico o secundario.

### 2.4.3 Tratamiento secundario de aguas residuales

Consiste en un conjunto de procesos biológicos cuya finalidad es eliminar la materia orgánica que está presente en las aguas residuales. En estos procesos los microorganismos transforman la materia orgánica en biomasa celular, energía, agua y otros compuestos.

Los procesos biológicos más utilizados son:

- **Lodos activados:** Consiste en un reactor biológico en donde los microorganismos están en suspensión en el agua a tratar y se suministra aire mediante un sistema de difusión, principalmente de burbuja fina.
- **Lagunas de estabilización:** Son cuerpos de agua creados artificialmente, normalmente contruidos de tierra, presentan un bordo libre entre 0.5 y 1.0 metro dependiendo del área de la laguna.
- **Filtros percoladores:** El sistema de filtro percolador o rociador consiste en un tanque de forma circular conteniendo un lecho filtrante formado por un relleno de grava, carbón, pedacería de ladrillo, piedra triturada o módulos de plástico de tipo laminar.
- **Biodiscos:** Consiste en una serie de discos montados en un eje central horizontal rotatorio, e instalados en un tanque de concreto.
- **Lagunas aeradas:** Es una laguna a la cual se le han instalado aeradores mecánicos o difusores de aire que mediante burbujeo proporcionan la cantidad de oxígeno suficiente con el objeto de favorecer el crecimiento y reproducción de

bacterias aerobias que llevan a cabo el proceso de depuración del agua (Moeller, y otros, 2011).

#### 2.4.4 Tratamiento terciario de aguas residuales

El tratamiento terciario consiste sobre todo en la eliminación de los agentes patógenos, sobre todo bacterias fecales y de los nutrientes. Este tratamiento es opcional y normalmente se hace cuando el agua se va a reutilizar como, por ejemplo, en jardines u otros espacios públicos para que no supongan un peligro para la salud humana, o en el caso de que los cauces receptores se encuentren en espacios protegidos o con una alta calidad en sus aguas.

Tiene como objetivo complementar los procesos anteriormente mencionados para lograr efluentes más puros, que cumplan con la normatividad y que pueda ser utilizado para diferentes usos como recarga de acuíferos, agua industrial, entre otras. las sustancias o compuestos comúnmente removidos son: fosfatos y nitratos, huevos y quistes de parásitos, sustancias tensoactivas, algas, bacterias y virus, sólidos totales y disueltos, temperatura (Rojas, 2002). La desinfección se puede realizar por métodos como:

- **Cloración:** Se debe tener especial cuidado porque en él se realiza la eliminación de coliformes fecales, los cuales pueden tener un impacto negativo, en especial sobre la salud humana, si estos no son removidos adecuadamente.
- **Luz ultravioleta:** Su uso principal es el control de virus y bacterias es un desinfectante eficaz debido a su fuerte capacidad germicida. Es efectiva contra protozoarios
- **Intercambió iónico:** Es un proceso de tratamiento que se usa para eliminar iones indeseables del agua y remplazarlos con iones deseables.
- **Ozono:** Reduce los parámetros de vertido especialmente solidos suspendidos, solidos disueltos, fenoles, color y olor.

En la Tabla 2.1 se presentan los principales procesos que se utilizan en los diferentes niveles de tratamiento de las aguas residuales.



**Tabla 2.1. Tipos de tratamiento de aguas residuales**

<p><b>Tratamiento Primario</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cribado</li> <li>▪ Sedimentación</li> <li>▪ Flotación</li> <li>▪ Separación de aceites</li> <li>▪ Homogeneización</li> <li>▪ Neutralización</li> </ul>
<p><b>Tratamiento Secundario</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lodos activados</li> <li>▪ Aeración prolongada</li> <li>▪ Estabilización por contacto</li> <li>▪ Modificaciones del sistema convencional de lodos activados: aeración por fases, mezcla completa, aeración descendente, alta carga, aeración con oxígeno puro.</li> <li>▪ Laguna de estabilización</li> <li>▪ Laguna con aeración</li> <li>▪ Filtros biológicos</li> <li>▪ Tratamientos anaerobios</li> </ul>
<p><b>Tratamiento Terciario</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Microtamizado</li> <li>▪ Filtración</li> <li>▪ Precipitación y coagulación</li> <li>▪ Adsorción (carbón activado)</li> <li>▪ Intercambio iónico</li> <li>▪ Osmosis inversa</li> <li>▪ Electrodiálisis</li> <li>▪ Cloración y ozonización</li> <li>▪ Proceso de reducción de nutrientes</li> </ul>

### **2.4.5 Uso del carbono como suplemento**

En muchas de las veces un agua residual de origen industrial no contiene la cantidad necesaria de materia orgánica que requieren los microorganismos para realizar su síntesis celular, por tal motivo se requiere adicionar un suplemento que contenga carbono.

La alimentación de una fuente de carbono debe ser calculada y controlada en base a las necesidades específicas del proceso, en algunos casos al adicionar un suplemento, los microorganismos pueden tomar varias semanas en adaptarse a la nueva fuente de carbono, por lo que, la alimentación nunca debe ser intermitente.

La cantidad de la fuente de carbono no siempre es constante, en algunas ocasiones se debe aumentar, en otras solo se debe agregar en pequeñas proporciones, todo esto depende de las características del agua residual, para evitar variaciones importantes en el sistema.

Los compuestos orgánicos comunes que se utilizan incluyen; metanol, etanol, azúcar, jarabe de maíz con alto contenido de fructuosa, acetato, glicerina, almidón de maíz, malaza, aceite de destilería y productos comerciales (Tabla 2.2).

#### **a) Metanol**

El metanol y otros compuestos tales como la glicerina y productos de carbono suplementario comercialmente disponibles, se han agregado a muchos sistemas de desnitrificación como carbono suplementario. Como compuesto de carbono único la degradación del metanol la realizan las bacterias más especializadas, que no son las mismas que crecen en los sustratos orgánicos de las aguas residuales afluentes.

El metanol se usa comúnmente como fuente de carbono para mejorar la desnitrificación en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, con la variabilidad de los precios y las preocupaciones de seguridad asociadas con el bajo punto de inflamación (49°C) del metanol, es necesario considerar fuentes alternativas de carbono (Colombia, 2011).

### b) Etanol

En caso usar etanol como fuente de carbono, se debe proceder a una adaptación suave de la biomasa, en dosis crecientes, respetando estas condiciones el etanol si es biodegradable en un tanque aerobio.

### c) Glicerina

El uso del glicerol o glicerina es especialmente atractivo ya que es un subproducto de la producción de biodiesel y se espera que este cada vez más disponible. también se conoce que el glicerol puede fomentar una cinética de desnitrificación más alta que el metanol y es buena fuente de carbono.

### d) Acetato

Algunos sustratos de carbonos externos como el acetato son fácilmente biodegradables por la mayoría de las bacterias heterótrofas que crecen en las aguas residuales.

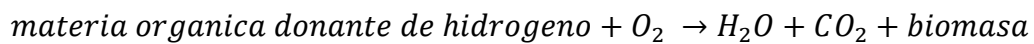
**Tabla 2.2. Poblaciones de microorganismos en diferentes tipos de fuentes de carbono**

<b>Fuente de carbono</b>	<b>Grupos funcionales dominantes</b>
Metanol	<i>Methylophilales</i> <i>Methyloversatilis</i> <i>Hyphomicrobium</i> <i>Paracoccus</i>
Etanol	<i>Methyloversatilis</i> <i>Azoarcus</i> <i>Dechloromonas</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Hydrogenophaga</i>
Acetato	<i>Comamonas</i> <i>Acidovorax</i> <i>Thauera</i> <i>Dechloromonas</i> <i>Paracoccus</i> <i>Rhodobacter</i>
Glicerol	<i>Comamonas</i> <i>Bradyrhizobium</i> <i>Diaphorobacter</i> <i>Tessaracoccus</i>

Fuente de carbono	Grupos funcionales dominantes
Glucosa	<i>Arthrobacter</i> <i>Phenyllobacterium</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Proteobacterium</i>

### 2.4.6 Tratamiento aerobio

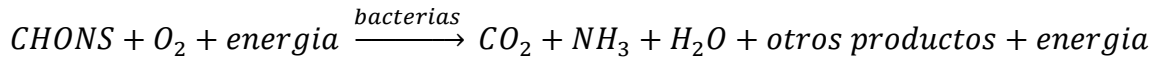
Son procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno (Ilustración 2-6). En este proceso el oxígeno libre es el único aceptador final de electrones; el oxígeno es reducido y el carbono es oxidado, al igual que la materia orgánica o inorgánica. El sustrato suministra la fuente de alimento a los microorganismos y se transforma en condiciones aerobias en biomasa, dióxido de carbono y agua (Metcalf&Eddy, 2003).



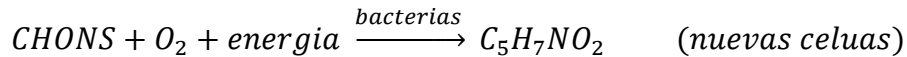
**Ilustración 2-6. Reactor Aerobio de PTAR Gachupina, Jiutepec**

Cuando existe ausencia de materia orgánica el tejido celular de los microorganismos realiza la respiración endógenamente y se convertirá en energía. Existen tres reacciones primordiales las cuales ocurren de manera simultánea y son: catabolismo, anabolismo y autólisis.

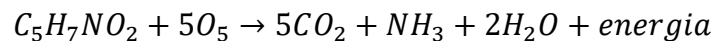
Catabolismo (oxidación)



Anabolismo (síntesis)



Autólisis (auto oxidación o respiración endógena)



Dentro del tratamiento aerobio en aguas residuales existen diferentes procesos de tratamiento biológico suspendidos empleados para la eliminación de la materia orgánica carbonácea los principales son: lodos activados, lagunas aireadas, reactor de flujo discontinuo o secuencial y el proceso de digestión aerobia. Los procesos biológicos también se emplean para llevar a cabo el proceso de nitrificación (conversión de nitrógeno amoniacal en nitrato), estos procesos incluyen; los filtros percoladores, filtros de pretratamiento o desbaste, reactores biológicos con biodiscos y reactores de lecho fijo. De todos estos procesos, el tratamiento de lodos activados es el más empleado, proporcionando así un efluente de alta calidad (Metcalf&Eddy, 2003).

### **2.4.7 Tratamiento anaerobio**

Los procesos anaerobios se realizan en ausencia de oxígeno. En este proceso ocurren reacciones fermentativas en las que la materia orgánica se transforma en energía, metano y dióxido de carbono.

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y de degradación en el cual, parte de los materiales orgánicos de un substrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidoras por el oxígeno o sus precursores (Vanero & Salinas, 2011).

En la Tabla 2.3 se presenta quien será el donador y aceptor de electrones según el tipo de tratamiento en el que se encuentren.

**Tabla 2.3. Clasificación de los microorganismos dependiendo de la condición en la que se encuentren**

Condición	Donador de electrón	Aceptor final de electrón
<b>Aerobia</b>	Materia orgánica o inorgánica	O <sub>2</sub>
<b>Anóxica</b>	Materia inorgánica	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
<b>Anaerobia</b>	Materia orgánica o inorgánica	Materia orgánica, HCO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>

## 2.5 Eliminación biológica de nutrientes

Los nutrientes presentes en las aguas residuales de tipo doméstico normalmente están en cantidad suficiente para los microorganismos; sin embargo, habrá influentes como algunos de origen industrial, que requieren la adición de nutrientes para su tratamiento por medios biológicos.

Los niveles de Nitrógeno y Fosforo deben ser monitoreados en el efluente del clarificador para saber si están presentes y si se cumple con las condiciones de descarga de estos parámetros. Es necesario determinar estos parámetros en muestras filtradas para que no se contabilicen los sólidos biológicos presentes en la muestra. Si los sólidos biológicos no se retienen; el Nitrógeno y Fosforo de los microorganismos se sumarán al disponible como alimento. Como regla general se sabe que a 100 kg de DBO<sub>5</sub> le corresponden 5 kg de N, y 1 kg de P para que exista una buena relación de nutrientes (Metcalf & Eddy, 2014).

### 2.5.1 Nitrificación

Es un proceso biológico de oxidación del amoníaco en nitrito que luego es seguido por la oxidación del nitrito en nitrato a gas nitrógeno. Las bacterias nitrificantes juegan un papel importante en el tratamiento de aguas residuales.

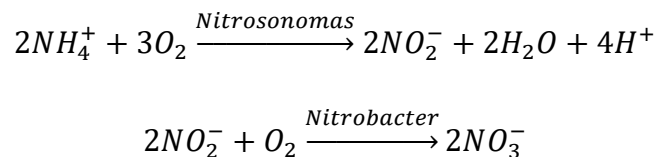
El proceso de nitrificación está controlado por una serie de factores como la disponibilidad de oxígeno y la disponibilidad de amoníaco. La actividad de las bacterias

nitrificantes también disminuye en condiciones ácidas y a una temperatura superior a 35°C (Passen, 2021).

Uno de los parámetros más críticos en el proceso de nitrificación es la relación entre la demanda química de oxígeno y el nitrógeno en la alimentación, debido a que el contenido de carbono/nitrógeno del agua residual determina la competencia en el crecimiento que se establece entre las poblaciones de microorganismos autótrofos y heterótrofos que llevan a cabo el proceso.

Aunque la oxidación de la materia carbónica y de la nitrogenada puede ocurrir simultáneamente, la nitrificación normalmente no comienza hasta que la demanda química de oxígeno de la materia carbónica ha sido prácticamente satisfecha (Ramalho, 2004).

La nitrificación tiene lugar en dos etapas:



La nitrificación puede suprimirse por la adición de ciertos productos químicos como azul de metileno y tiourea. Estos inhiben el crecimiento de las Nitrosomonas y los Nitrobacter.

### 2.5.2 Desnitrificación

La reducción biológica de nitrato o nitrito a gas nitrógeno se denomina a este proceso desnitrificación. Es una parte integral para la eliminación biológica del nitrógeno, este es el método más elegido para la eliminación de nitrógeno para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. La eliminación biológica de nitrógeno es importante en el tratamiento de aguas residuales donde existe una preocupación por la eutrofización y donde las aguas subterráneas deben protegerse contra concentraciones elevadas de NO<sub>3</sub>-N, cuando el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales se utiliza para recargar aguas subterráneas y otras aplicaciones.

Debido a que el sustrato orgánico en las aguas residuales afluentes proporciona el donante de electrones para las reacciones de oxidación-reducción que utilizan nitrato, el proceso se denomina desnitrificación del sustrato.

Los procesos preanoxicos y postanoxicos de desnitrificación emplean bacterias heterótrofas para la reducción de nitrato, pero existen otras vías para la eliminación. La desnitrificación también puede lograrse mediante bacterias nitrificantes heterótrofas y autótrofas. Las bacterias autótrofas también pueden lograr la desnitrificación en condiciones anaerobias.

### **2.5.2.1 Desnitrificación por bacterias heterótrofas**

La desnitrificación puede ocurrir en condiciones aerobias por bacterias nitrificantes heterótrofas, de modo que la nitrificación y la desnitrificación simultánea existen con la conversión de amoníaco en productos de nitrógeno gaseoso. La bacteria heterótrofa *Paracoccus pantotropha*, se ha estudiado extensamente para la oxidación simultánea de amoníaco y la reducción de nitrato. La oxidación del amoníaco por parte de bacterias heterótrofas requiere energía, que puede obtenerse por reducción de nitrato o nitrito usando acetato por *P.pantotropha* en condiciones aerobias (Metcalf & Eddy, 2014).

### **2.5.2.2 Desnitrificación autótrofa**

Se ha descubierto que varias bacterias autótrofas son capaces de reducir nitratos o nitritos y oxidar una variedad de donantes de electrones, incluidos Fe (II), compuestos de azufre y amoníaco. Se ha demostrado que la oxidación de amoníaco por Nitrosomonas en condiciones anóxicas es lenta y de poca importancia en el tratamiento de lodos activados (Metcalf & Eddy, 2014).

### **2.5.3 Oxidación Biológica**

Al descargar residuos sobre un recurso hídrico o sobre el suelo se crea, generalmente, un problema de control de calidad asociado con las diferentes características indeseables de los desechos, de las cuales es muy importante la presencia de materia orgánica, la cual es estabilizada biológicamente por los microorganismos en condiciones aerobias o anaerobias. La oxidación biológica es la conversión bacteriana



de los elementos de su forma orgánica a su forma inorgánica altamente oxidada en un proceso también conocido como mineralización. La mineralización, o descomposición microbiológica del material orgánico de las aguas residuales en productos finales inorgánicos como dióxido de carbono, agua, nitrógeno amoniacal o nitratos, ortofosfatos y sulfatos, es característica de la oxidación aerobia de carbohidratos y lípidos: sin embargo, no se aplica a muchos compuestos aromáticos que tienen alta masa molecular, alto estado de oxidación y son estables bioquímicamente (Romero Rojas, 2005).

#### **2.5.4 Eliminación biológica del carbono**

La eliminación de carbono es el tratamiento más importante en depuración biológica de aguas residuales. El proceso de utilización de la materia orgánica puede resumirse como la transformación de un compuesto por un conjunto de microorganismos a través de sus diferentes rutas metabólicas. Los microorganismos utilizan este sustrato por dos vías fundamentales: la vía disimilatoria (reacciones de producción de energía) y la vía asimilatoria (reacciones de síntesis). La primera de ellas tiene como misión fundamental proveerlos de la energía necesaria para desarrollar las funciones vitales, mientras que la segunda supone la utilización de la materia orgánica para la producción de nueva biomasa celular y o el mantenimiento de las estructuras celulares (Arnaiz, Isac, & Lebrato, 2000).

Existen tres vías disimilatorias fundamentales por las que se obtiene energía a partir de compuestos carbonados: la vía respiratoria aerobia, la vía respiratoria anaerobia y la fermentación.

- **Eliminación biológica aerobia de carbono orgánico**

La respiración es una vía disimilatoria de producción de energía en el que los compuestos orgánicos reducidos son oxidados por el oxígeno molecular.

- **Eliminación anaerobia de carbono orgánico**

La biodegradación anaerobia consiste en la transformación, por medio de microorganismos, de la materia orgánica de las aguas residuales en compuestos

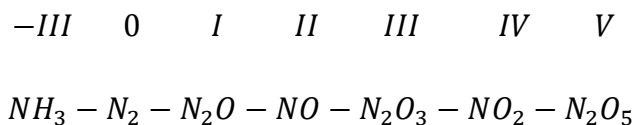
gaseosos reducidos como el metano, el amoníaco y el ácido sulfúrico, además de dióxido de carbono (Moletta R, 1993).

### 2.5.5 Eliminación biológica de nitrógeno

Los elementos nitrógeno y fosforo son esenciales para el crecimiento de microorganismos, plantas y animales, se conocen como nutrientes o bioestimulantes. También se necesitan pequeñas cantidades de otros elementos, como el hierro, para el crecimiento biológico, pero el nitrógeno y el fosforo son, en la mayoría de los casos, los principales nutrientes de importancia.

Debido a que el nitrógeno es un componente esencial en la síntesis de proteínas, se requieren datos de este para evaluar la capacidad de tratamiento de las aguas residuales mediante procesos biológicos. La insuficiencia de nitrógeno puede hacer necesaria su adición para que el desecho sea tratable. Las principales fuentes de compuestos nitrogenados son: los compuestos nitrogenados de origen vegetal y animal, el nitrato de sodio y el nitrógeno atmosféricos.

La química del nitrógeno es compleja debido a los diversos estados de oxidación que se pueden presentar y al hecho de que los organismos vivos pueden provocar cambios en el estado de oxidación. Para complicar aún más las cosas, los cambios en el estado de oxidación provocados por las bacterias pueden ser positivos o negativos dependiendo de si prevalecen las condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Los estados de oxidación del nitrógeno se resumen:



Las formas más comunes e importantes del nitrógeno en las aguas residuales y su estado de oxidación correspondiente en el medio ambiente agua/suelo son amoníaco ( $NH_3$ ), amonio ( $NH_4^+$ ), nitrógeno gas ( $N_2O$ ), ion nitrito ( $NO_2^-$ ), y ion nitrato ( $NO_3^-$ ) (Metcalf & Eddy, 2014).

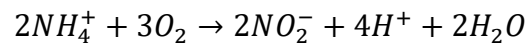
El nitrógeno se puede eliminar biológicamente mediante tres procesos generales:

- Nitrificación-Desnitrificación
- Nitratación -Desnitrificación
- Nitrificación - Oxidación anaeróbica de amonio

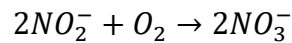
Se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones fundamentales del proceso para poder comprender el proceso de nitrificación-desnitrificación, entre ellas se debe considerar: la biología, la cinética y estequiometría del proceso, los requisitos de alcalinidad, la importancia del carbono inorgánico, la necesidad de carbono orgánico y la necesidad de carbono orgánico degradable.

Las principales reacciones de nitrificación son las siguientes:

Conversión biológica de amonio a nitrito



Conversión biológica de nitrito a nitrato

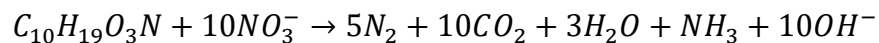


Reacción de oxidación total

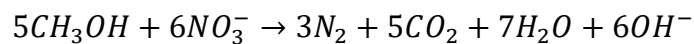


Para la desnitrificación la cantidad de compuesto orgánico biodegradable necesaria para reducir el nitrato a nitrógeno gaseoso depende de la fuente de carbono, como se puede observar en las siguientes ecuaciones, en las que los compuestos orgánicos de las aguas residuales, el metanol o el acetato se utilizan para la reducción de nitrato.

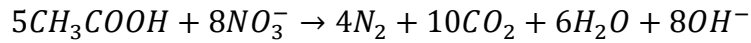
Aguas residuales:



Metanol



Acetato



### 2.5.6 Eliminación biológica de fósforo

El fósforo en las aguas residuales se puede clasificar en términos generales en dos fracciones: partículas y disuelto. Cada una de esas fracciones se puede diferenciar aún más como reactiva y no reactiva.

El fósforo reactivo se define como las formas de fósforo que responden a pruebas colorimétricas sin hidrólisis preliminar o digestión oxidativa. Tenga en cuenta que los ortofosfatos reactivos incluyen tanto las formas solubles como las que se unen de forma suelta o se adsorben en los precipitados. Las formas solubles de fósforo que se encuentran en soluciones acuosas incluyen los ortofosfatos (reactivos), los polifosfatos (ácidos hidrolizables) y los fosfatos orgánicos (digeribles). Los ortofosfatos (ejemplo:  $PO_4^{3-}$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $H_2PO_4^-$ ,  $H_3PO_3$ ) están disponibles para el metabolismo biológico sin degradación adicional. El fósforo orgánico suele ser de menor importancia en la mayoría de los desechos domésticos, pero puede ser un componente de los desechos industriales y lodos de aguas residuales.

Las formas solubles no reactivas del fósforo son de gran interés porque no se eliminan fácilmente con los procesos de tratamiento biológico y químico. Se han encontrado concentraciones de fósforo no reactivo soluble en efluentes.

Por lo tanto, la presencia de formas no reactivas de fósforo, como ocurre con el nitrógeno no biodegradable, puede dificultar el cumplimiento de los límites de permiso de descarga extremadamente bajos (Metcalf & Eddy, 2014).

El fósforo es esencial para el crecimiento de microorganismos y plantas. Es de interés removerlo de las aguas residuales municipales debido a que al ser descargados a los cuerpos de agua superficiales favorecen la eutrofización. La concentración en este tipo de aguas varía de 6 a 20 mg/L (Moeller, y otros, 2011).

Los sistemas convencionales de lodos activados utilizan el fósforo del agua residual únicamente para la síntesis de nuevas células. Sin embargo, cuando los lodos activados se exponen alternativamente a condiciones anaerobias y aerobias, las

células asimilan más fósforo del requerido para la síntesis celular. Este fenómeno es conocido como Eliminación Biológica Incrementada de Fósforo (Barajas, 2002).

## **2.6 Parámetros de calidad del agua**

### **2.6.1 Demanda química de oxígeno (DQO)**

Es el oxígeno tomado por una muestra de agua residual del dicromato de potasio después de o tres horas de reflujo o digestión con ácido sulfúrico concentrado. Casi todas las sustancias orgánicas se oxidan virtualmente en su totalidad por este procedimiento, con la excepción de ciertos compuestos aromáticos, como la piridina, el benceno o el tolueno. El valor de DQO da, por tanto, una idea del contenido orgánico total de una muestra de agua residual sea o no biodegradable, de manera que la relación DBO/DQO constituye un indicador para la materia orgánica presente y que son biodegradable. La DQO puede separarse en soluble y total. La DQO soluble, representa la fracción biodegradable y se requiere un tratamiento previo de la muestra, la cual estrictamente debe incluir coagulación-floculación, aunque frecuentemente se utiliza la filtración (CONAGUA, 2019).

### **2.6.2 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**

La prueba de DBO estima el oxígeno gastado en la descomposición de una muestra residual, y es, efectivamente, una simulación de laboratorio del proceso microbiano de auto purificación. Se trata de una prueba de largo tiempo establecida, propuesta originalmente en 1913, con una amplia aceptación. Se diluye, de manera conveniente, una muestra de agua residual con cierto contenido de residuos y microorganismos. Se mide la concentración del oxígeno disuelto, se incuba la mezcla a una temperatura ya determinada y, después de cierto tiempo prefijado, se mide de nuevo la concentración de oxígeno disuelto.

El cambio en la cantidad de oxígeno disuelto da la cantidad de oxígeno no utilizado durante este tiempo por los microorganismos al metabolizar nutrientes de dicha cantidad de muestra de agua residual. De este resultado se calcula la cantidad de oxígeno requerido para el tratamiento similar de un volumen real de agua residual en  $\text{g/m}^3$  o  $\text{mg/litro}$ . Se debe tener cautela tanto en el funcionamiento de la prueba como en

la interpretación de sus resultados. Como la prueba DBO es esencialmente un sistema microbiano de crecimiento, la mezcla de microorganismos utilizados debe contenerlos tipos capaces de metabolizar las sustancias presentes en la muestra de agua residual. Además, las sustancias presentes en la prueba deben suministrar un razonable balance nutricional para los microorganismos

Las limitaciones de la prueba de DBO, especialmente, es el largo periodo que transcurre entre el momento en que se toma la muestra y se obtiene el resultado, y esto ha llevado a realizar pruebas químicas para evaluar la demanda de oxígeno. La oxidación de los contaminantes en la muestra se efectúa usando un agente químico oxidante, los de uso más común son el permanganato ácido de potasio, el dicromato ácido y el oxígeno a altas temperaturas (CONAGUA, 2019).

Una clara comparación entre los parámetros de calidad DBO Y DQO se presenta en la Tabla 2.4. Comparacion entre DBO y DQO

**Tabla 2.4. Comparacion entre DBO y DQO**

DBO	DQO
Tiempo prolongado de análisis	Análisis rápido
Baja reproducibilidad	Altamente reproducible
Es más común para el diseño aerobio	Es común en el diseño de sistemas anaerobios
No asegura nitrificación	No permite la oxidación del $\text{NH}_4^+$
Medición directa de la biodegradabilidad	Biodegradabilidad solo con gradientes de medición
No es posible el balance de electrones	El balance de electrones se basa en la medición

### 2.6.3 Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y Nitrógeno total (NT)

Nitrógeno total (NT) es la suma de nitrato-nitrógeno ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), nitrito-nitrógeno ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) y nitrógeno unido orgánicamente. El nitrógeno total (NT) no debe confundirse con TKN (nitrógeno total de Kjeldahl), que es la suma de nitrógeno

amoniaco más nitrógeno unido orgánicamente, pero no incluye nitrógeno nitrato o nitrógeno nitrito.

Nitrógeno total a veces se regula como un parámetro de efluente para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, pero es más común que se establezcan límites en una forma de nitrógeno individual, como el amoníaco. Las plantas de tratamiento que tienen un límite NT generalmente necesitarán nitrificarse y desnitrificarse para alcanzar el límite NT. Debido a que el nitrógeno en las aguas residuales se puede encontrar en cuatro formas principales cada forma principal generalmente se analiza como un componente separado, con Nitrógeno total calculado a partir de la suma de las cuatro formas (Velp, 2022).

Cuando existe mayormente el nitrógeno en forma de nitratos en un agua residual es un fiel indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. Y si el medio es aerobio, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitritos.

#### **2.6.4 Nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>)**

El amoníaco, como iones amonio o como amoníaco libre, es el contaminante nitrogenado que se encuentra con mayor frecuencia, ya que además de ser un producto natural de descomposición, es un producto industrial clave. El amoníaco reduce la efectividad en la cloración, que se usa como etapa final del tratamiento para eliminar trazas de materia orgánica y microorganismos patógenos. Además ejerce una demanda muy alta de oxígeno, requiriendo más de 4.5 veces su propio peso de oxígeno para su completa oxidación (CONAGUA, 2019).

#### **2.6.5 Fosforo total (PT)**

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas (NMX-AA-029-SCFI, 2001).

### 2.6.6 Sólidos suspendidos totales (SST)

Es la cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento, se mide mg/L (CONAGUA, 2019).

Es el material soluble constituido por los sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 µm secado y llevado a masa constante a una temperatura de 105 °C ± 2 °C (NMX-AA-034-SCFI, -2015).

### 2.6.7 Sólidos disueltos totales (SDT)

Es la cantidad total de sólidos disueltos en el agua. Está relacionada con la conductividad eléctrica (CONAGUA, 2019).

Es una medida de la materia en una muestra de agua, más pequeñas de 2 micras (2 millonésimas de un metro) y no pueden ser removidos por un filtro tradicional. SDT es básicamente la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltas en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua (Singler, 2017).

### 2.6.8 Sólidos sedimentables

Son aquellos sólidos que sedimentan cuando el agua se deja en reposo durante 1 hora. Se determinan volumétricamente mediante el uso del cono Imhoff o una probeta (CONAGUA, 2019).

En la Tabla 2.5 se clasifican los tipos de sólidos presentes en las aguas residuales y sus respectivas fracciones.

**Tabla 2.5. Tipos de sólidos presentes en las aguas residuales.**

Sólidos	Fracción total	Fracción volátil (materia orgánica)	Fracción fija (materia inorgánica)
Totales	ST	STV	STF



Suspendidos	SST	SSV	SSF
Disueltos	SDT	SDV	SDF

## 2.7 Parámetros operacionales

### 2.7.1 Índice volumétrico de lodos (IVL)

Este se define como el volumen en mililitros ocupado por 1 gramo de sólidos en suspensión del licor mezclado (SSTLM), expresado en peso seco, después de sedimentar durante 30 min en una probeta graduada de 1000 mL.

$$IVL = \frac{\text{volumen de lodo} \left(\frac{ml}{L}\right)}{SSTLM \left(\frac{g}{L}\right)}$$

Los valores típicos de IVL para lodos de buenas características de sedimentación con concentraciones de 800 a 3500 mg/L están comprendidos dentro del intervalo 150 a 350 mg/L.

Ahora bien, la determinación de esta prueba puede revelar mucha información si se realiza de una manera correcta y tomando en consideración lo siguiente:

- El comportamiento de los microorganismos no es igual en la mañana, al medio día, por la tarde o por la noche.
- Se deberá establecer si se realizará una o varias veces al día (se recomienda una o varias veces por turno).
- Se deberá realizar a la misma hora todos los días, esto es por ejemplo; a las 9:00 o 12:00 o 15:00 o 23:00, esto con la finalidad de que los resultados sean comparables.
- Se deberá realizar a la sombra, ya que la temperatura afecta la velocidad de sedimentación.
- Se deberá tomar el volumen del lodo cada cierto lapso de tiempo, por ejemplo, cada 3 o 5 min.

- Los datos obtenidos se Graficarán, para obtener una curva de sedimentabilidad, que dará una idea del tipo de lodo que se tiene en el reactor biológico.
- Durante la prueba se podrá apreciar la forma del floculo, su color y olor.

Al final de la prueba, el aspecto del sobrenadante también puede ayudar a tener una idea del tipo de lodo que existe en el reactor biológico y de lo que se espera en el sedimentador secundario.

La información que se obtenga de esta prueba ayudará a conocer el comportamiento del sistema y a detectar rápidamente problemas operacionales (Moeller, y otros, 2011).

### **2.7.2 Control del gasto de recirculación**

El objetivo principal de regresar lodos al tanque de aeración es el de mantener una concentración lo más constante de SSV en el mismo, ya que estos salen más rápido de lo que se reproducen, por lo que si no se realiza esta actividad de retorno se corre el riesgo de que en el reactor vaya disminuyendo paulatinamente la concentración de microorganismos, repercutiendo finalmente en la calidad del agua tratada.

Es recomendable que la recirculación se realice en continuo, ya que de otra forma la concentración de SSVLM disminuirá paulatinamente y después aumentará drásticamente, en ambos casos nunca se tendrá la concentración adecuada de SSV en el reactor biológico provocando problemas en la calidad del agua tratada, principalmente en la remoción de materia orgánica. Además, de una excesiva acumulación de lodo en el sedimentador secundario. El gasto de recirculación puede calcularse basándose en requisitos de operación, variando de acuerdo con las estaciones del año (CONAGUA, 2019).

### **2.7.3 Relación alimento/microorganismos (A/M)**

Para controlar de manera efectiva el proceso de su planta de tratamiento, el operador necesita conocer las cargas orgánicas que entran y salen del sistema. Los dos parámetros de mayor importancia que se deben cuantificar para aguas residuales son la DBO<sub>5</sub> y los SST; aunque en el caso del tratamiento de aguas residuales diferentes a las domésticas, tal vez se requiera adicionar más parámetros.

La concentración de DBO<sub>5</sub> es particularmente importante, pues con este parámetro se calcula la cantidad de alimento que entra al sistema y que será asimilado por los microorganismos en el tanque de aeración y está definida por la siguiente ecuación:

$$A = \text{carga organica} = \text{gasto} * \text{concentracion de SSV}$$

$$A = \text{carga organica} = Q * S_o$$

Otro aspecto que debe considerar el operador es la carga de microorganismos que se encuentran en el reactor biológico y que serán los encargados de oxidar la materia orgánica presente en el agua residual, ésta se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M = \text{carga de SSV} = \text{volumen del reactor} * \text{concentracion de SSV}$$

$$M = \text{carga de SSV} = V * SSVLM$$

Para formar un buen lodo en el tanque de aeración y que éste sedimente bien en el clarificador, además de lograr una buena eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub>, se debe mantener un balance adecuado de la cantidad de DBO<sub>5</sub> que entra al tanque y la cantidad de SSVLM presentes en el mismo. Este balance se controla con el parámetro denominado relación A/M (alimento/microorganismos). La relación varía de acuerdo con el proceso de tratamiento o modificación al mismo.

La relación A/M se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{A}{M} = \frac{\text{alimento que entra al sistema por dia}}{\text{masa de microorganismos en el tanque de aereacion}}$$

$$\frac{A}{M} = \frac{\text{kg de DBO}_5 \text{ influentes al tanque de aeracion}}{\text{kg de SSVLM (en el tanque de aeracion)}}$$

Cuando se utiliza la relación A/M como parámetro de control en una planta de tratamiento, se tiene el inconveniente de que A (alimento), es una variable independiente, sin embargo, se puede tener cierto grado de control con un tanque de homogeneización. Además, en la industria se puede lograr a través de la regulación de alguna descarga del proceso productivo.

El parámetro M (microorganismos) es la parte controlable de la relación A/M; éste representa los sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aeración que se controlan mediante la recirculación y purga de lodos activados.

Cuando el parámetro es utilizado como control de la planta, es responsabilidad del operador controlar la concentración de SSVLM; en otras palabras, el operador debe controlar la cantidad de microorganismos de acuerdo con el alimento disponible.

Si la relación A/M es demasiado alta, hay necesidad de disminuir la purga de lodos y aumentar la recirculación para que entren más microorganismos al sistema. Si la relación A/M es muy baja, entonces se requiere aumentar la purga de lodos, disminuir la recirculación para que entren menos microorganismos al sistema.

Los parámetros para el cálculo de la (A/M) deben obtenerse de la planta, la DBO<sub>5</sub> del influente al tanque de aeración y los SSVLM del tanque de aeración para tener un valor más preciso y real (Moeller, y otros, 2011).

### **2.7.3.1 Para relaciones A/M por debajo del límite inferior establecido**

Si la cantidad de alimento presente en el sistema es insuficiente para mantener el crecimiento de microorganismos, estos se ven obligados a vivir bajo el sistema de respiración endógena. Una célula de bacteria típica contiene un material citoplasmático rico en proteínas y ácido ribonucleico y es la principal porción de la célula que se metaboliza durante el proceso de respiración endógena. El residuo que queda del metabolismo endógeno está constituido principalmente por cápsulas celulares muy ligeras que resisten la sedimentación. Esta es la razón por la cual a relaciones bajas de A/M el lodo tiene unas características muy pobres para su sedimentación (Moeller, y otros, 2011).

### **2.7.3.2 Para relaciones de A/M por arriba del límite superior establecido**

Hay un predominio de un tipo de microorganismos de naturaleza filamentosa (*Sphaerotilus*). Este tipo de colonias no decanta bien permaneciendo en suspensión

casi continuamente. El lodo inflado bajo estas condiciones es el que se denomina “bulking” (Moeller, y otros, 2011).

### **2.7.3.3 Para valores de A/M comprendidos entre estos dos extremos**

El lodo tiene buenas características de sedimentación. El lodo bajo estas condiciones se denomina floculante (Moeller, y otros, 2011).

### **2.7.4 Tiempo medio de retención celular (TMRC)**

Otro parámetro de control es el tiempo medio de retención celular (TMRC) o edad del lodo activado. Es un parámetro que se debe mantener en ciertos límites para que la operación de la planta sea eficiente.

$$TMRC = \frac{\text{kg de SSVLM en el tanque de aeracion}}{\Delta SSV \text{ (produccion neta de biomasa, Kg SSV por dia)}}$$

La edad de los lodos es una medida del tiempo en que los microorganismos son retenidos idealmente en el sistema de tratamiento. La edad de lodos (TMRC) afecta directamente a la sedimentación; un lodo joven puede generar un crecimiento biológico disperso caracterizado por sedimentación deficiente; un lodo viejo se caracteriza por baja actividad y densos flóculos que sedimentan rápidamente con poca acción de arrastre, resultando un efluente turbio.

La mejor edad del lodo para una planta en particular debe seleccionarse de acuerdo con la experiencia en la operación y será aquel que produzca el mejor efluente. En general, con edades de lodos grandes la producción de lodos será poca, porque el alimento es escaso y los microorganismos estarán en fase endógena, sin embargo, se requerirá una mayor cantidad de oxígeno. Pero con edades pequeñas, la tasa de crecimiento es mayor y la producción de lodos aumenta.

Edades de lodos entre 4 y 7 días son muy comunes en plantas con el propósito de remover sólo DBO carbonosa, este tipo de plantas son relativamente estables. Las bacterias nitrificantes crecen y se reproducen más lentamente que las bacterias carbonosas. Edades de lodos entre 12 y 20 días garantizan una nitrificación total,

especialmente en ambientes fríos. Un lodo nitrificado que permanece por un tiempo prolongado en el sedimentador y sin oxígeno puede presentar desnitrificación, en donde el gas nitrógeno arrastrará lodo hacia la superficie deteriorando la calidad del agua. Edades mayores a 20 días, generalmente se presentan en procesos de aeración extendida (Romero R.J, 2005).

## **2.8 Factores limitantes en el crecimiento de los microorganismos**

Los microorganismos, al igual que el resto de los seres vivos, necesitan nutrientes y otros factores específicos para cumplir con su ciclo de vida; cada organismo es distinto, por lo que los elementos para su crecimiento también dependerán de esas variables.

### **2.8.1 Temperatura**

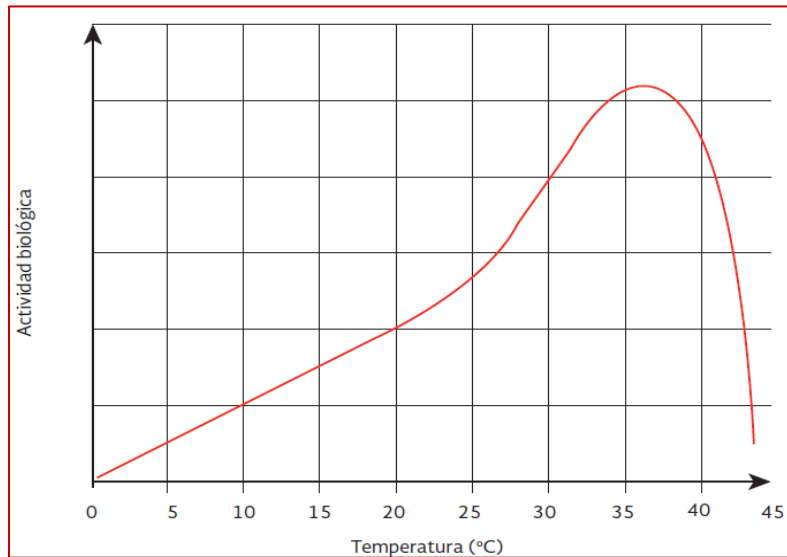
La temperatura es un parámetro importante por su efecto en otras propiedades, por ejemplo, aceleración de reacciones químicas, reducción en la solubilidad de los gases, intensificación de sabores y olores (Moeller, y otros, 2011).

La temperatura en las aguas residuales suele ser más alta que la del suministro de agua local debido a la adición de agua caliente en los hogares y las actividades industriales. Como el calor específico del agua es mucho mayor que el del aire, las temperaturas de las aguas residuales son más altas que las temperaturas del agua local durante la mayor parte del año. Según su ubicación y la época del año, las temperaturas del efluente pueden ser más altas o bajas que los valores correspondientes del afluente.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante debido a su efecto sobre las reacciones químicas y las velocidades de reacción. El aumento de la temperatura, por ejemplo, puede provocar un cambio en las especies de peces que pueden existir en el cuerpo de agua receptor.

Las temperaturas óptimas para la actividad bacteriana están en el rango de 25 °C a 35°C (Gráfica 2-1). La digestión aeróbica y la nitrificación se detienen cuando la temperatura sube a 50 °C. Cuando la temperatura desciende a 15 °C, las bacterias

productoras de metano se vuelven bastante inactivas y a 5 °C, las bacterias nitrificantes autótrofas prácticamente dejan de funcionar. A 2 °C incluso las bacterias químico heterótrofas que actúan sobre el material carbonoso se vuelven inactivas (CONAGUA, 2019).



**Gráfica 2-1. Relación temperatura-actividad microbiana**

Fuente Manual de la CONAGUA

### **2.8.2 Oxígeno disuelto (OD)**

Es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para todas las demás formas de vida aerobias. Sin embargo, el OD es solo ligeramente soluble en agua. La cantidad real de O<sub>2</sub> (y también de otros gases) que puede estar presente en una solución se rige por: la solubilidad del gas, la presión parcial del gas en la atmosfera, la temperatura y la concentración de las impurezas en el agua (Metcalf & Eddy, 2014).

### **2.8.3 pH**

Es la concentración de iones de hidrogeno en una disolución, utiliza la notación pH como medida de la naturaleza acida o alcalina de una solución acuosa. Muchas propiedades dependen de la concentración del ion de hidrogeno en solución.

En las aguas residuales urbanas el pH se encuentra entre 6.5 y 8.5. Valores elevados en este caso mayores a 9.2 tienen efectos inhibidores del crecimiento. Cuando los valores están comprendidos entre 5 y 9 (situándose los más favorables entre 6.5 a 8.5) la vida de especies acuáticas es favorecida (Cartro J, 2003).

La concentración de iones de hidrogeno es un parámetro de calidad importante tanto para las aguas naturales como para las aguas residuales. Se define como:

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

Las aguas residuales con una concentración extrema de iones de hidrogeno son difíciles de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la descarga, el efluente de aguas residuales puede alterar la concentración en las aguas receptoras naturales (Metcalf & Eddy, 2014) .

## **2.9 Proceso de lodos activados**

### **2.9.1 Generalidades de Operación del proceso**

Para poder operar y realizar un control adecuado de los procesos de tratamiento biológico es indispensable entender que este es un sistema que está controlado por microorganismos y que responden a cualquier cambio, ya sea físico o químico.

Es así, que un proceso de lodos activados está constituido por microorganismos o por conglomerados bacterianos que forman flóculos, es por esto el nombre de activado, y el de lodo por el aspecto de color café.

Lo primero que se da en cualquier sistema biológico es la adsorción, al que se le conoce como proceso de estabilización, así una vez que ha sido cubierta esta capacidad del flóculo, es que inicia un proceso de absorción, síntesis y oxidación de la materia orgánica. Aunque, algunas moléculas más complejas, son descompuestas por la acción de enzimas segregadas por las bacterias, antes de ser absorbidas. Es posible que exista una porción imposible de ser absorbida y permanezca en el flóculo como materia inerte. Todo lo anterior sucede bajo condiciones aerobias.



Esto hace a los microorganismos un factor importante en el proceso de lodos activados, al remover la materia orgánica y producir nuevos flóculos. Sin embargo, éstos dependen para su buen desarrollo de la concentración de materia orgánica afluyente, cantidad de oxígeno suministrado y de la mezcla que origine éste en el reactor, otro factor importante es la temperatura, la cual puede aumentar o disminuir la actividad microbiana y por último la cantidad de microorganismos presentes en el sistema ya que es importante guardar una buena relación con la materia orgánica del afluyente.

Todo lo anterior lleva a resumir que el proceso de lodos activados se desarrolla de la siguiente manera. El agua residual con una concentración de materia orgánica es vertida a un tanque de aeración, en donde las bacterias la metabolizan mediante el empleo de oxígeno, produciendo nuevas bacterias y generando dióxido de carbono, agua y otros productos. Sin embargo, una parte de las bacterias mueren y liberan su contenido celular, que es utilizado por otras bacterias. Toda esta mezcla, cuantificada como sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSTLM), es separada en un sedimentador, en donde el agua tratada es clarificada y los lodos recirculados al tanque de aeración.

Ahora bien, el tipo y la cantidad de microorganismos presentes en el sistema de lodos activados pueden ayudar a entender las diferentes condiciones de operación que se presentan (CONAGUA, 2019).

El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; tienen la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual se debe su nombre de activado (Diagrama 2-1). El resultado final es una porción de materia orgánica, susceptible de descomposición biológica, convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activo adicional (Romero Rojas, 2005).

El proceso de lodos activados tiene como objetivo remover la materia orgánica, en términos de DBO, de las aguas residuales. La remoción de DBO se logra por la conversión biológica, en presencia de oxígeno molecular, por microorganismos, de la

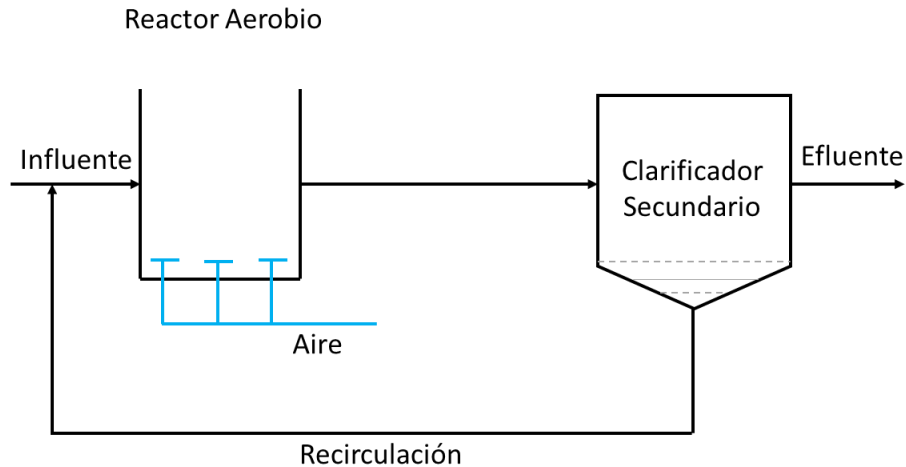
DBO en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y en nuevas células de microorganismos. Los microorganismos formados se separan por sedimentación gravimétrica. La combinación de microorganismos y agua residual se conoce como lodo activado. Los lodos en el reactor biológico están sujetos a un proceso de auto oxidación, conocido como respiración endógena, proceso que también consume oxígeno.

El oxígeno requerido para el funcionamiento del proceso se suministra por medio de aireadores mecánicos o difusores. Los aireadores mecánicos pueden ser con turbina sumergida o superficial de alta o de baja velocidad. La generación de lodos biológicos depende de las características del substrato, la relación A/M y la edad de lodos. (CONAGUA, 2019).

Los lodos activados tienen diferentes modalidades tales como:

- **Proceso convencional**

Todas las aguas negras sedimentadas se mezclan con los lodos activados recirculados a la entrada del tanque de aeración. El volumen de lodos recirculados es de 20 a 30% del volumen de aguas residuales que se van a tratar. Los tanques de aeración se diseñan de manera que proporcionen un tiempo de residencia hidráulica de 6 a 8 horas. Los lodos activados se recirculan en una proporción que mantengan un contenido de sólidos de 1000 a 2500 mg/L en el licor mixto. El índice de lodos y su edad, según se determinen para cada planta, caerán respectivamente dentro de los límites de 100 a 200 y de 3 a 4 días. Se puede esperar una eficiencia global de la planta de 80-95% (Valencia & Marulanda, 2003).

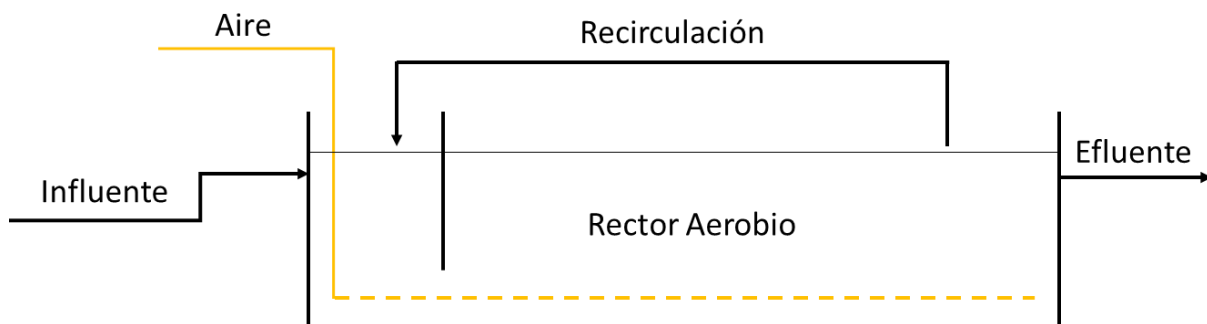


**Diagrama 2-1. Proceso convencional de lodos activados**

- **Aeración extendida**

Esta modificación consiste en aumentar el tiempo de retención hidráulica en el sistema de 18 a 36 horas en lugar de 4 a 8 horas que emplea el proceso convencional (Diagrama 2-2). Este periodo de aeración permite que el lodo sea parcialmente digerido dentro del tanque de aeración, esto es, los microorganismos están en una fase endógena y para lograrlo se requiere de una relación alimento/microorganismos baja.

Este proceso teóricamente puede no generar lodo al entrar los microorganismos en fase endógena, pero no es muy recomendable, debido a que la población microbiana puede hacerse vieja disminuyendo la eficiencia del proceso y repercutiendo en la calidad de agua de salida. Por lo que se recomienda realizar pequeñas purgas. (Moeller, y otros, 2011).

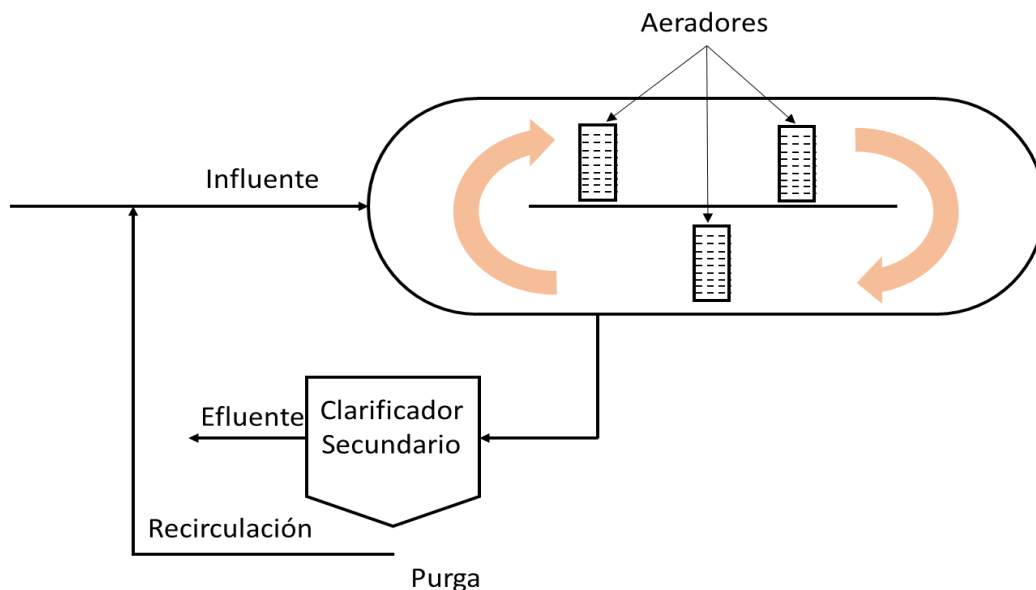


**Diagrama 2-2. Aeración extendida facilita la digestión aerobia de los microorganismos dentro del sistema**

- **Zanjas de oxidación**

Las zanjas de oxidación son una variante del proceso de lodos activados por aeración extendida. El proceso se asemeja a la autopurificación de un río que mantiene condiciones aerobias en su recorrido, con una inoculación de microorganismos (lodos activados) en el lugar de la aplicación de las aguas residuales (Diagrama 2-3 ).

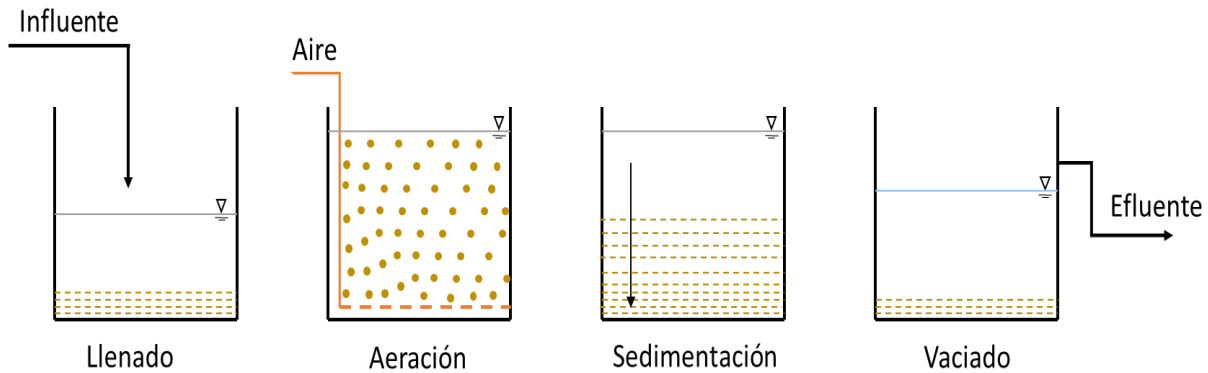
El proceso se basa en suministrar el oxígeno por medio de rotores o aeradores mecánicos que hacen circular el agua en un canal cerrado, esta actividad también se puede llevar a cabo por difusores que se complementan con agitadores superficiales o sumergidos (Moeller, y otros, 2011).



**Diagrama 2-3. Zanjas de oxidación tienen una configuración de anillo, óvalo o tanque en forma de herradura con uno o varios canales**

- **Reactor Biológico Secuencial**

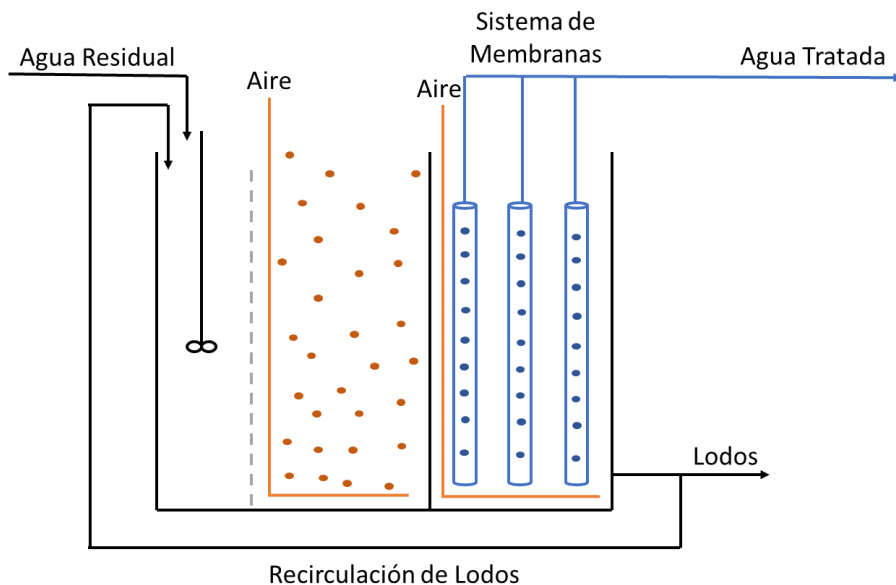
Son reactores discontinuos que pueden combinar en un mismo tanque todas o partes de las fases de tratamiento (Diagrama 2-4 ) de un sistema de depuración de oxidación total: mezcla, reacción, aeración, sedimentación, clarificación y extracción del agua depurada y de los lodos en exceso (ECODENA, 2023).



**Diagrama 2-4. Reactor biológico secuencial pueden combinar en un mismo tanque todas o partes de las fases del tratamiento**

- **Birreactor con membranas sumergidas**

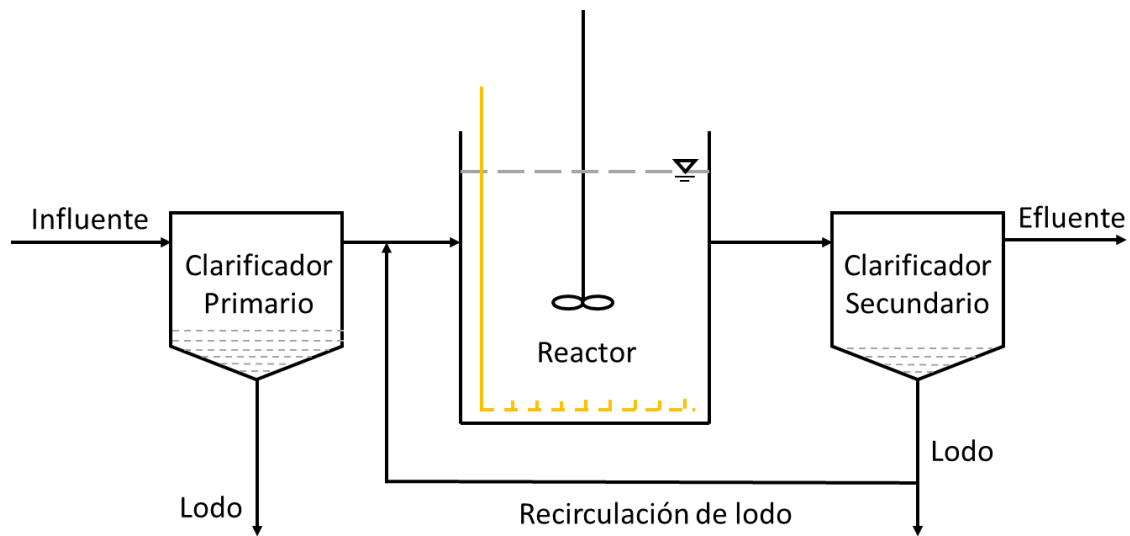
El biorreactor de membrana sintetiza dos sistemas básicos La degradación biológica y la separación por membrana inciden de forma simultánea en los sistemas MBR En este sistema sólidos en suspensión y microorganismos son separadas de agua tratada gracias a su sistema de ultrafiltración (Diagrama 2-5). La biomasa totalmente delimitada por el sistema ofrece un efluente desinfectado, controlando el tiempo en que los microorganismos permanecen en el sistema (Bluegold, 2020).



**Diagrama 2-5. Birreactor con membranas sumergidas, la degradación biológica y la separación por membrana ocurren simultáneamente**

- **Mezcla completa**

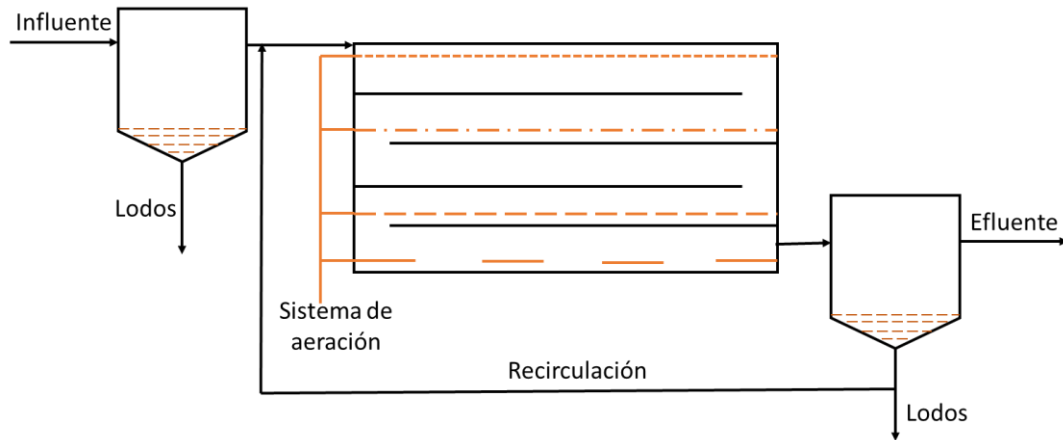
Un reactor de mezcla completa es un recipiente tipo tanque, el cual debe mantenerse agitado todo el tiempo que esté funcionando (Diagrama 2-6). Este tipo de reactores poseen una entrada de reactivos y una salida de productos constante, existiendo una homogeneidad en cualquier punto dentro del tanque, lo que facilita la reacción química que se produce en su interior (Noguera, 2020).



**Diagrama 2-6. Mezcla completa al existir una homogeneidad dentro del tanque, esta facilita las reacciones**

- **Aeración decreciente**

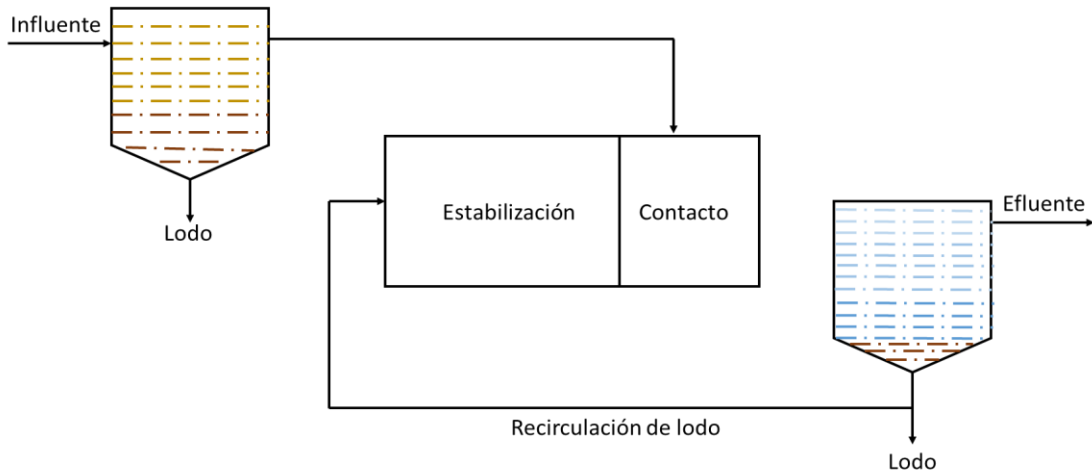
Este proceso se desarrolló basándose en la teoría que se necesita mayor cantidad de aire en el comienzo del periodo de aeración (Diagrama 2-7). Por este motivo, la proporción de aire que se introduce en las aguas residuales es mayor en la sección de entrada del tanque de aeración cuando la demanda es mayor, y se va disminuyendo proporcionalmente, conforme el sustrato avanza en el tanque y la demanda decrece (Valencia & Marulanda, 2003).



**Diagrama 2-7. Aeración decreciente, al inicio del proceso se necesita mayor cantidad de aire para estabilizar la materia orgánica**

- **Estabilización-contacto**

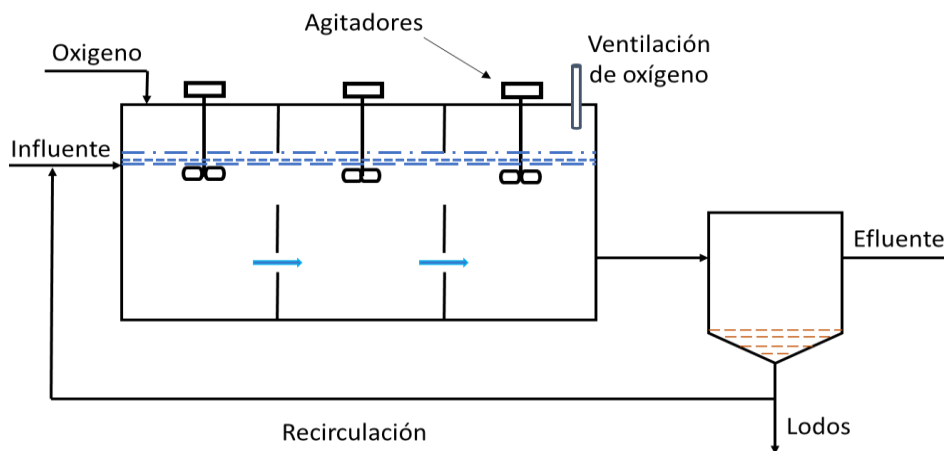
Modificación del proceso de lodos activados en el cual hay un breve período de contacto entre el agua residual y el lodo para la eliminación rápida de la  $DBO_5$  soluble por adsorción, seguido de un período de aeración más prolongado en un estanque separado, donde el lodo se oxida y el lodo nuevo se sintetiza (Diagrama 2-8). El proceso es adecuado para el tratamiento de aguas residuales en las que la mayor parte de la  $DBO_5$  se halla en forma coloidal y en suspensión. En plantas prefabricadas, el proceso de estabilización por contacto se utiliza para reducir el volumen del estanque de aeración necesario en el proceso de aeración prolongada (extendida). Debido a los cortos tiempos de contacto que se utilizan (20 a 40 minutos), el proceso de contacto y estabilización se debe emplear en combinación con instalaciones de regulación de caudales o cuando los caudales son más grandes y no están sujetos a diferencias tan notables (Nuñez, 2014).



**Diagrama 2-8. Estabilización contacto hay un breve periodo de contacto entre el agua residual y el lodo para la eliminación más rápida de DBO<sub>5</sub>**

- **Sistema de oxígeno puro**

Aproximadamente desde 1970, existe un marcado interés por remplazar el aire en el sistema de lodos activados por oxígeno puro. En la práctica, los tanques de aeración son cubiertos, con mezcla completa y el oxígeno introducido es recirculado. Debido a la producción de CO<sub>2</sub> y a la utilización de oxígeno por los microorganismos, como resultado de su actividad metabólica, una porción del gas debe desecharse y reemplazarse con oxígeno puro (Diagrama 2-9). Los promotores del proceso señalan como ventajas del mismo una actividad bacteriana mayor, volúmenes de lodo y del tanque de aeración menores y mejor sedimentabilidad del lodo (Romero R.J, 2005).



**Diagrama 2-9. Sistema de oxígeno puro se utiliza en un tanque de aeración cerrado**



- **Proceso de alta tasa**

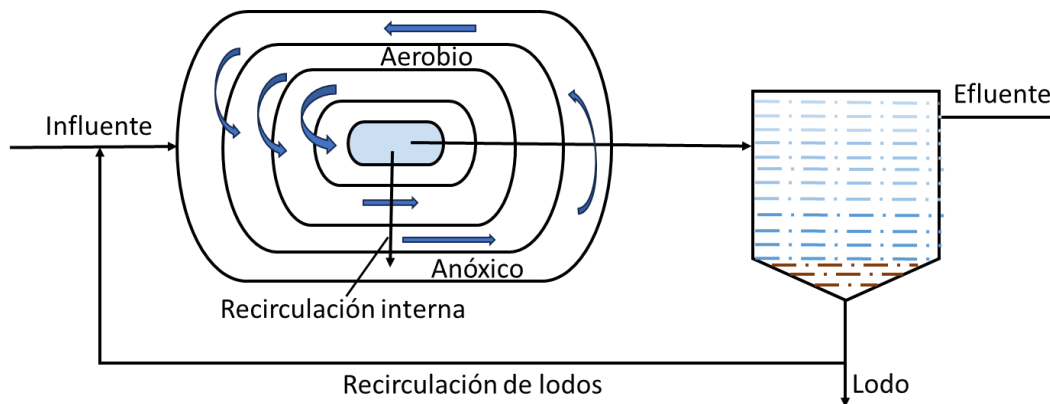
El proceso de lodos activados de tasa alta es una modificación en la cual se combina una carga volumétrica alta con una concentración de sólidos suspendidos grande en el licor mezclado, tiempos de retención cortos, relación alta de alimento/microorganismos y edad de lodos reducida, con el objeto de disminuir los costos de construcción. En este tipo de plantas, para mantener mezcla y oxigenación adecuada, es necesario usar mezcladores de turbina; además, se requiere mayor capacidad del sedimentador secundario para compensar la menor sedimentabilidad del lodo y las tasas altas de recirculación de lodos (Romero R.J, 2005).

- **Orbal**

Este sistema consiste en una serie de canales concéntricos, en los que las cantidades de oxígeno suministrado varían de un canal a otro.

El agua pasa, inicialmente, al canal periférico y a través de pasos sumergidos, va circulando de un canal a otro para llegar finalmente a un decantador. La característica principal del sistema orbal es el diferente grado de oxigenación que se mantiene en los distintos canales, típicamente operando en 0, 1 y 2 mg/L de oxígeno disuelto en el primer, segundo y tercer canal respectivamente (Diagrama 2-10).

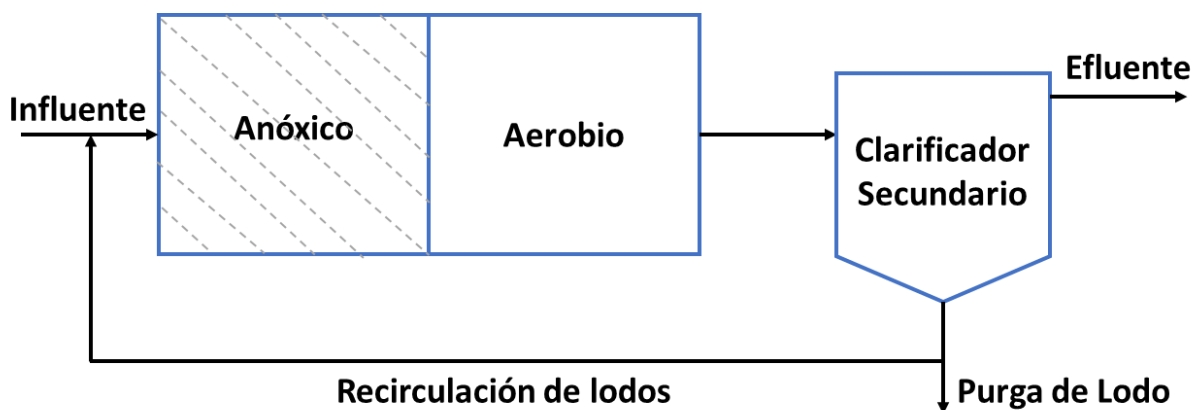
El sistema es idóneo para procesos de nitrificación-desnitrificación, ya que el agua entra en el primer canal y el fango allí existente empieza a degradar la materia orgánica, empezando a desarrollarse bacterias desnitrificantes (zona de poco oxígeno), posteriormente el agua va pasando por los canales más oxigenados donde va sufriendo procesos de oxidación biológica y nitrificación. El licor mezcla se recircula del tercer al primer canal, permitiendo que los nitratos formados sean transformados en nitrógeno atmosférico por las bacterias desnitrificantes (estrucplan, 2008).



**Diagrama 2-10. Proceso Orbital es idóneo para procesos de nitrificación-desnitrificación**

### 2.9.2 Modalidad Ludzack-Ettinger

Es un proceso biológico de dos etapas desnitrificación-nitrificación, con una zona anaerobia seguida de una aerobia (Diagrama 2-11). La zona anaerobia se coloca antes que la aerobia, esto permite que la zona de desnitrificación posea una fuente de materia orgánica. Esta fuente es necesaria para llevar a cabo el proceso de desnitrificación, tarea realizada por las bacterias desnitrificantes que utilizan el oxígeno contenido en el nitrato para metabolizar la materia orgánica presente en el agua residual. Por otro lado, en la segunda etapa, se produce la reducción final de la materia orgánica mediante un proceso de biodegradación en condiciones aerobias (Ontiveros, Alberto, & Campanella, 2010).



**Diagrama 2-11. Proceso convencional de Ludzack-Ettinger**

El primer concepto de remoción biológica de nitrógeno preanóxico fue una secuencia de operación anóxico-aeróbica propuesta por Ludzack y Ettinger en 1962, al cual

llamaron Proceso Ludzack–Ettinger. Este proceso se basa en que el nitrato formado en la zona aeróbica es regresado vía la recirculación de lodos (RAS) a la zona anóxica. Debido a que la única o principal alimentación de nitrato en la zona anóxica es aquella del RAS, la desnitrificación se ve limitada enormemente por la relación de recirculación. Sin embargo, este proceso ha sido utilizado para incrementar la relación de recirculación del RAS y prevenir el aumento del lodo en los sedimentadores secundarios debido a la desnitrificación (Metcalf & Eddy, 2014).

### **2.9.3 Modalidad Ludzack-Ettinger Modificado**

En este proceso, según se presenta en el Diagrama 2-12, un tanque anóxico se añade licor mezclado de recirculación procedente de la zona aerobia para obtener altos niveles de desnitrificación. En el tanque aerobio, las bacterias autotróficas (nitrificadoras) convierten el nitrógeno amoniacal a nitrógeno en forma de nitritos y luego a nitratos. En la zona anóxica, las bacterias heterotróficas convierten el nitrógeno en forma de nitratos a nitrógeno gaseoso, que es liberado a la atmósfera. Parte del licor mezclado del tanque aeróbico es recirculado a la zona anóxica para suministrar un licor mezclado con un alto contenido de nitratos.

En general el proceso consiste en dos tanques separados, el primero anóxico y el segundo aeróbico. Agua residual y lodo activado recirculado son introducidos al primer reactor, el cual opera en condiciones anóxicas. El licor mezclado fluye luego al segundo tanque que opera en condiciones aeróbicas (EPA, 1999).

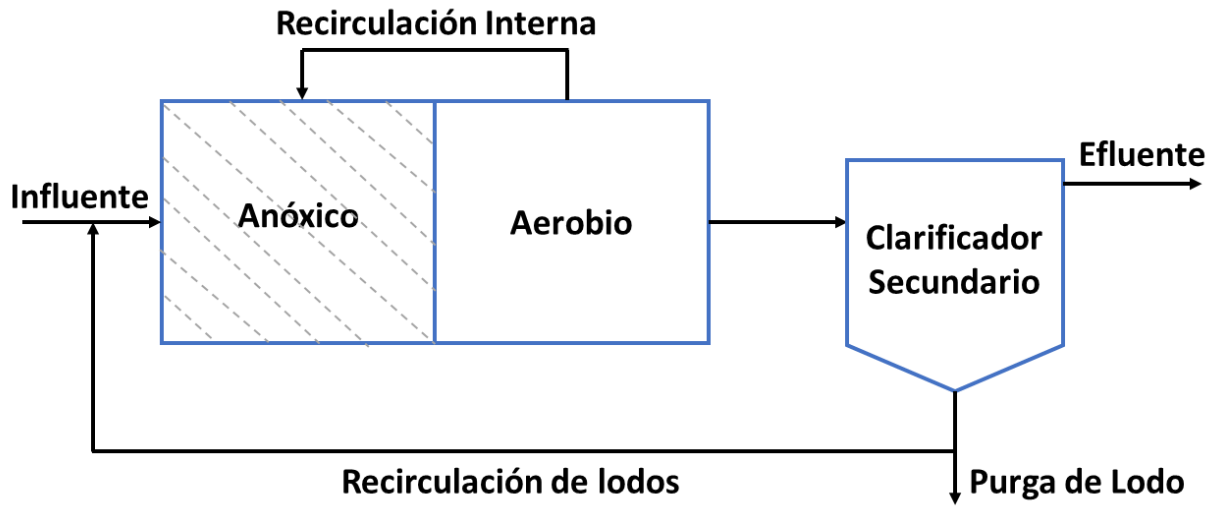


Diagrama 2-12. Proceso modificado de Ludzack-Ettinger

### 3 JUSTIFICACIÓN

Las características de las aguas residuales varían según su procedencia, en las domésticas usualmente están presentes todos los nutrientes necesarios para los microorganismos y en las industriales se presenta una deficiencia de éstos.

Para la correcta operación del sistema de tratamiento, y en especial de lodos activados, es importante mantener una relación alimentos/microorganismos que permita obtener la calidad del agua que se desea o que cumpla con una normatividad.

En este sentido, un agua residual industrial es difícil de tratar, muchas veces por su falta de fuente de carbono. Es por esto que se hace necesario la adición de compuestos orgánicos ricos en carbono, tales como metanol, glicerina o acetato.

En este trabajo, se evaluará el producto "PB8055" como una opción viable de fuente de carbono, (60% de glicerina y 40% de agua, cloruro de sodio y metanol), para asegurar las funciones metabólicas de los microorganismos en un proceso de lodos activados, y que además proporcione un agua residual tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para su disposición.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 General

Analizar el impacto del suplemento PB8055 en un proceso de lodos activados en la modalidad Ludzack-Ettinger como suplemento de materia carbonácea.

### 4.2 Específicos

- Evaluar la influencia del producto PB8055 en el consumo de materia orgánica en un proceso de lodos activados en la modalidad Ludzack-Ettinger a través de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- Evaluar la influencia del producto PB8055 en la nitrificación y desnitrificación en un proceso de lodos activados en la modalidad Ludzack-Ettinger a través de la remoción del N-NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> y NT.
- Evaluar la influencia del producto PB8055 en el desarrollo de los microorganismos en un proceso de lodos activados en la modalidad Ludzack-Ettinger a través de los SSTLM.

## 5 METODOLOGÍA

La presente investigación se llevó a cabo mediante la ayuda de una planta piloto de lodos activados, la cual fue diseñada en la modalidad Ludzack-Ettinger, la cual es un proceso biológico de dos etapas desnitrificación-nitrificación, con un tanque anóxico seguido de un tanque aerobio.

- Selección del suplemento nutricional
- Acondicionamiento del prototipo
- Arranque y estabilización
- Monitoreo y control
- Análisis de resultados

### 5.1 Selección de suplemento nutricional

De acuerdo a la hoja técnica de la empresa **ChemTreat**, el producto PB8055 es un suplemento biológico a base de glicerina diseñado para proporcionar una fuente eficiente de carbono para una gran variedad de tratamientos biológicos de aguas residuales (Ilustración 5-1).



**Ilustración 5-1 Suplemento de materia carbonácea producto PB8055**

A continuación, en la Tabla 5.1 se presentan los componentes o ingredientes del producto PB8055.

**Tabla 5.1. Componentes del producto PB8055**

<b>Componentes</b>	<b>Peso %</b>
Glicerina	60-100
Agua	5-30
Cloruro de Sodio	5-10
Metanol	<0.5

La Tabla 5.2 describe las propiedades físicas del suplemento comercial PB8055

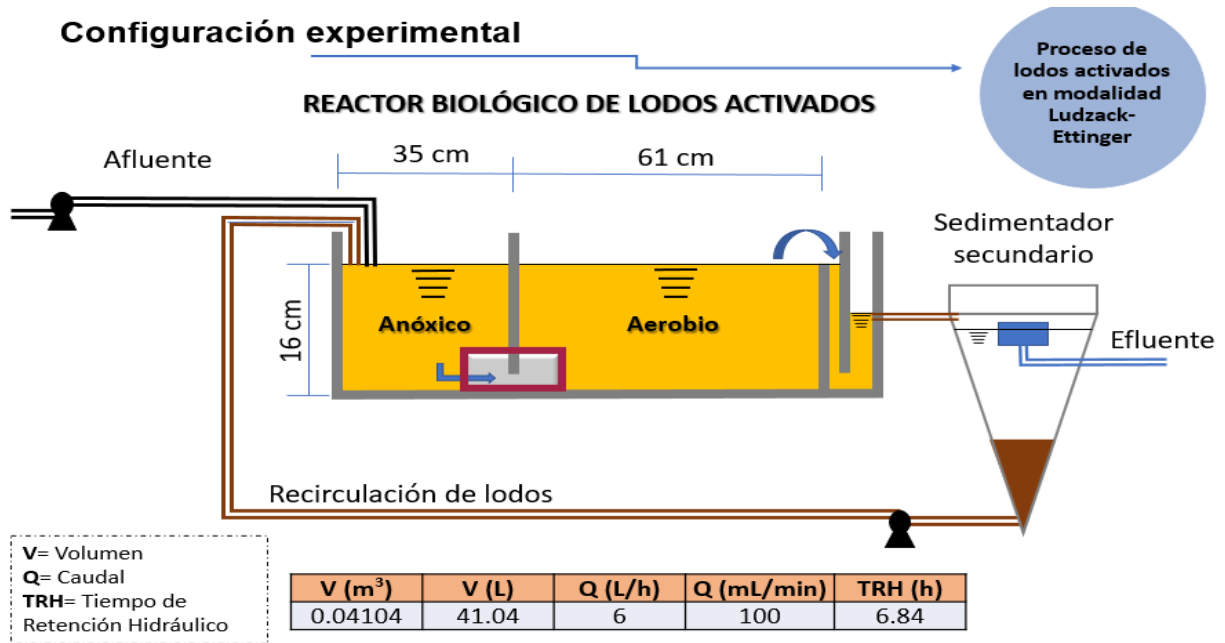
**Tabla 5.2. Propiedades físicas típicas del producto PB8055**

<b>Propiedad</b>	<b>Descripción</b>
Forma	Líquido
Color	Marrón
Claridad	Claro-Nublado
Olor	Leve
pH	5.0 - 7.5 (100.0%)
Gravedad específica	1.260 a 20°C

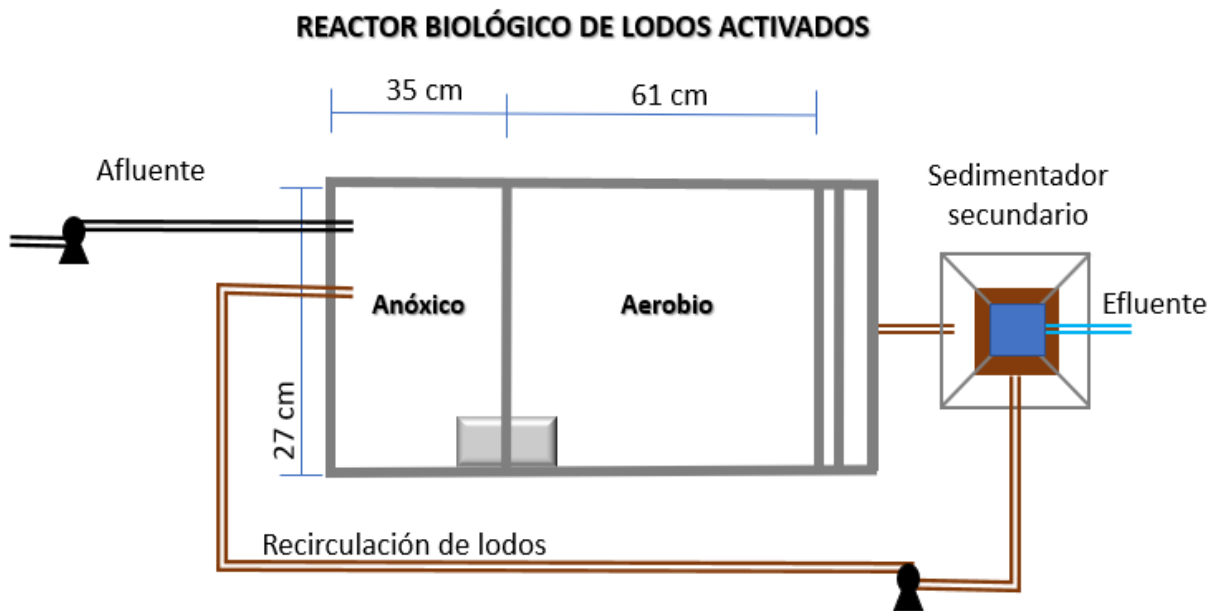
## **5.2 Configuración experimental**

A continuación, en la Figura 5-1 y Figura 5-2 se observa la configuración experimental del prototipo empleado en el proceso de lodos activados en una modalidad Ludzack-Ettinger, así como algunas de las condiciones establecidas para el proceso.





**Figura 5-1. Vista frontal del proceso de lodos activados en su modalidad Ludzack-Ettinger**



**Figura 5-2. Vista de planta del proceso de lodos activados en su modalidad Ludzack-Ettinger**

La Figura 5-3 es la vista frontal prototipo Ludzack-Ettinger empleado para el tratamiento de aguas residuales.



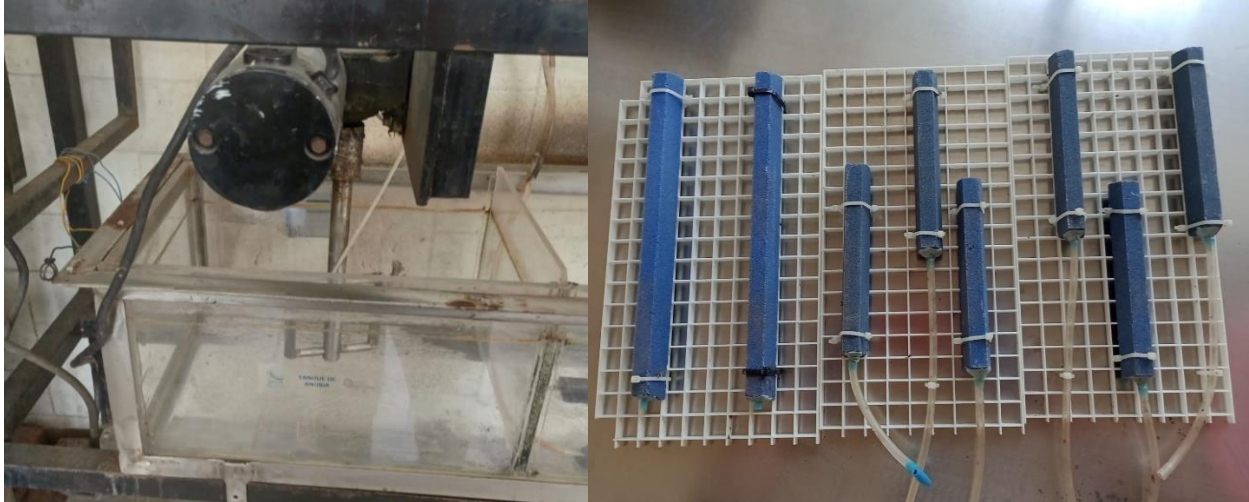
**Figura 5-3. Vista frontal del prototipo del proceso de lodos activados modalidad Ludzack-Ettinger convencional**

A continuación, en la Figura 5-4. Se muestra el clarificador utilizado el cual es complemento del sistema de tratamiento del prototipo.



**Figura 5-4. Vista frontal del clarificador utilizado para el prototipo del proceso de lodos activados modalidad Ludzack-Ettinger**

En la Figura 5-5 se muestran los difusores que están dentro del reactor aerobio y el mezclador del reactor anóxico.



**Figura 5-5. Mezclador dentro del reactor de anoxia y difusores empleados en el reactor aerobio**

En la Figura 5-6 se puede observar el prototipo después de realizar el arranque de planta bajo las condiciones establecidas.



**Figura 5-6. Vista frontal del prototipo lodos activados después del arranque**

### **5.3 Acondicionamiento del prototipo**

Se realizaron las pruebas pertinentes para verificar el correcto funcionamiento de todos los equipos dentro del proceso las cuales fueron:

- Prueba hidráulica en el reactor biológico y sedimentador secundario.
- Prueba de difusión y control de aire.
- Prueba del funcionamiento de las bombas.
- Prueba del funcionamiento del mezclador.
- Instalación de mangueras

En la Figura 5-7 se muestra el acoplamiento del prototipo.



**Figura 5-7. Acondicionamiento del prototipo**

## **5.4 Arranque y estabilización**

Una vez verificado el correcto funcionamiento de los equipos se procedió al arranque de la planta piloto de lodos activados.

Para facilitar el arranque del prototipo, el reactor biológico se inoculó, de tal manera que se obtuvo una concentración 1800 mg/L en el mismo.

Para realizar el arranque y estabilización se hicieron las siguientes actividades:

- Adicción del lodo al reactor
- Encendido de todos los equipos

- Llenado con el agua residual
- Regulación flujo de entrada y recirculación
- Estabilización del proceso por dos semanas
- Operación

## 5.5 Monitoreo y control

Las determinaciones analíticas influente y efluente del proceso de lodos activados se representan en la Tabla 5.3 y la Tabla 5.4.

**Tabla 5.3 Determinaciones analíticas al agua de entrada y salida**

Parámetro	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
DQO			✓		
NT			✓		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			✓		
N-NH <sub>3</sub>			✓		
PT			✓		
SST	✓	✓	✓	✓	✓
pH	✓	✓	✓	✓	✓
Q	✓	✓	✓	✓	✓

Para el tanque anóxico y aerobio se realizaron los siguientes parámetros de control.

**Tabla 5.4 Parámetros de control reactor anóxico y aerobio**

Parámetro	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Alimentación	✓				
IVL	✓	✓	✓	✓	✓
OD	✓	✓	✓	✓	✓
pH	✓	✓	✓	✓	✓
T	✓	✓	✓	✓	✓

### 5.5.1 Procedimientos para determinaciones analíticas

Las determinaciones analíticas se realizaron mediante el empleo de equipos HACH, por lo que a continuación se describen los procedimientos.

### **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

- DR/900 Método 8000
- Rango 20 a 1500 mg/L
- Calentar el digestor a 150 °C
- Tomar dos viales
- Adicionar 2 mL de muestra a un vial
- Adicionar al otro 2 mL de agua desionizada (blanco)
- Digerir por 120 min
- Enfriar a temperatura ambiente
- Programa 435
- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar DQO

### **Nitrógeno Total (NT)**

- DR/900 Método 10072
- Rango 10 a 150 mg/L
- Calentar el digestor a 103 -106 °C
- Tomar dos viales HR TNHDR y adicionar Nitrogen Persulfate Hidroxide
- Adicionar 0.5 mL de muestra a un vial y al otro 0.5 mL de agua desionizada
- Invertir vigorosamente por 30 seg
- Digerir por 30 min
- Enfriar a temperatura ambiente
- Programa 395 N, Total HR TNT
- Adicionar reactivo A
- Invertir vigorosamente por 15 seg
- Reacción por 3 min
- Adicionar reactivo B
- Invertir vigorosamente por 15 seg
- Reacción por 2 minutos
- Tomar dos viales de Total Nitrogen Reagent C
- Adicionar 2 mL de la muestra digerida blanco a un vial

- Adicionar 2 mL de la muestra digerida muestra al otro vial
- Invertir lentamente los viales 10 veces
- Reacción por 5 min
- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar NT

### **Fosforo Total (PT)**

- DR/900 Método 10127
- Rango 1.0 a 100 mg/L
- Calentar el digestor a 150 °C
- Tomar 2 viales Total Phosphotus Test N Tube
- Adicionar 5 mL de muestra a un vial
- Adicionar 5 mL de agua desionizada al otro vial
- Adicionar Potassium Persulfate a cada vial
- Agitar hasta disolver
- Digerir por 30 min
- Enfriar a temperatura ambiente
- Programa 541
- Adicionar 2 mL de hidróxido de sodio 1.54 N a cada vial e invertir varias veces
- Reacción por 7 min
- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar PT

### **N-Amoniaca**

- DR/900 Método 10072
- Rango 0.4 a 50 mg/L
- Programa 343 N
- Tomar 2 viales Am Ver
- Adicionar a los viales Ammonia Salicylate
- Adicionar a los viales Ammonia Cyanurate
- Cerrar e invertir varias veces para mezclar
- Reacción por 20 min



- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar amoniaco

### **N-Nitratos**

- DR/900 Método 8039
- Rango 0.3 a 30 mg/L
- Programa 355 N
- Llenar dos celdas con 10 mL de muestra
- Adicionar a una celda Nitra Ver 5
- Agitar vigorosamente por 1 min
- Reacción por 5 min
- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar N-Nitratos

### **Solidos Suspendidos Totales (SST)**

- Rango de 5 a 150 mg/L
- Programa 630
- Llenar una celda blanca con 10 mL de agua desionizada
- Llenar una celda con 10 mL de muestra
- Colocar blanco y calibrar a cero
- Determinar SST



**Ilustración 5-2. Realización de análisis**



### 5.5.2 Puntos de monitoreo

En la Figura 5-8 se presentan los puntos de todos los parámetros de control para un monitoreo de manera adecuada, cabe resaltar que siempre debe ser en el mismo lugar y la misma hora establecida para que los datos puedan ser comparables.

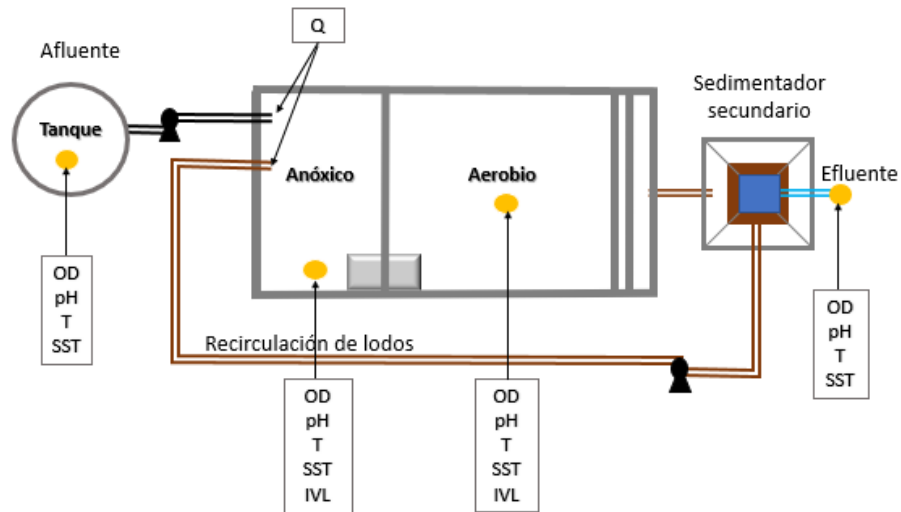


Figura 5-8. Puntos de monitoreo

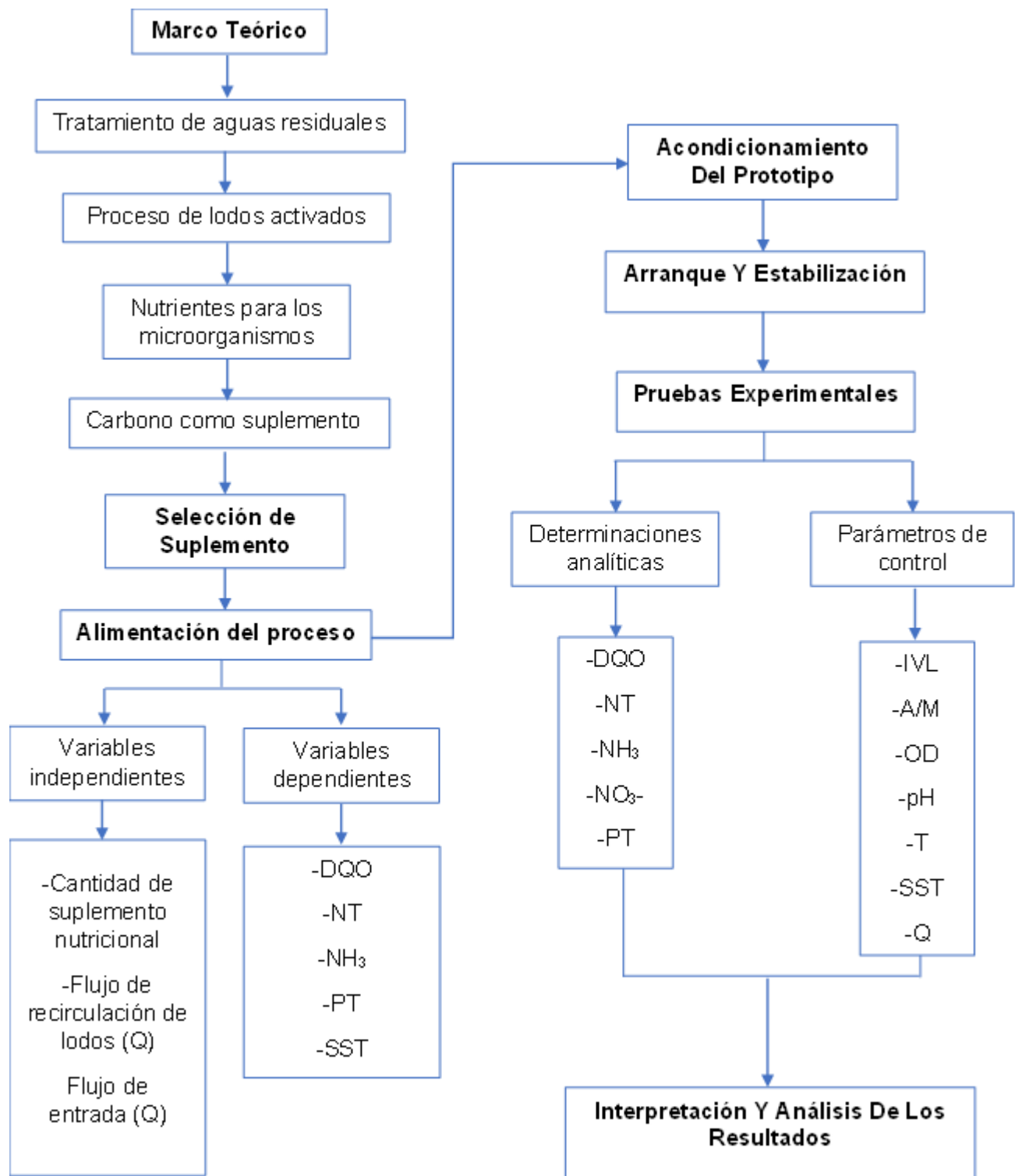
## 5.6 Análisis de resultados

Para el análisis de los resultados, se verificaba que la planta estuviera operando bajo las condiciones establecidas. Sino existieran problemas en el proceso, como el fallo de algún equipo o fugas y caudales tapados. Se procedió a realizar los parámetros de control. Mediante las determinaciones analíticas se analizó el agua del influente y el efluente del prototipo de lodos activados.

- Correcta operación
- Parámetros de control
- Determinaciones analíticas
- Calidad del agua

## 5.7 Diagrama metodológico

Se presenta el Diagrama 5-1 para el desarrollo de esta investigación con base a las actividades realizadas:



**Diagrama 5-1. Diagrama metodológico**

## 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación son los que se obtuvieron al operar un sistema piloto de tratamiento de lodos activados convencional en la modalidad Ludzack-Ettinger.

Las aguas residuales utilizadas son las que se generan de las diversas actividades que se realizan en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, y que son deficientes de carga orgánica, esto es con una demanda química de oxígeno menos a 130 mg/L.

El influente y efluente del sistema piloto fueron monitoreados desde el mes de agosto del 2022 hasta el mes de diciembre del 2022.

Para tener un punto de partida en el análisis de los resultados, se toma como referencia el estudio que realizó previamente Martínez, 2022 en donde se operó el sistema piloto de Lodos Activados modalidad Ludzack-Ettinger, con una relación de SSV/SST de 0.83 en el reactor biológico, y de acuerdo a la literatura se establece que para este tipo de proceso los SSV en el reactor deben estar entre 1500 y 3000 mg/L. Por lo que, haciendo uso de esta relación, se tiene que los SST deben estar en un intervalo de 1810 a 3615 mg/L.

Tomando en cuenta que el agua residual es de baja carga, esto de acuerdo a datos de estudios realizados por Reyna Martínez, se obtuvo que la DQO es de  $324 \pm 157$  mg/L y la DBO de  $149 \pm 37$  mg/L, lo que proporciona una relación DBO/DQO de 0.43.

Bajo esta premisa y considerando que la calidad del agua en este estudio sigue siendo la misma, se optó por mantener en el influente una DQO de alrededor 330 mg/L y con 1800 mg/L de SST en el reactor biológico.

### 6.1 Análisis de parámetros de control

#### 6.1.1 Oxígeno Disuelto (OD)

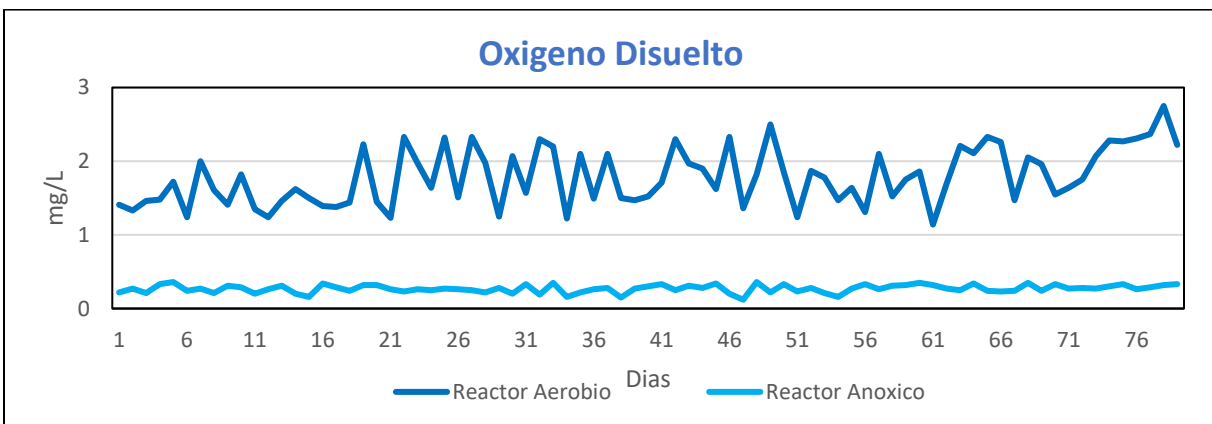
Los niveles de oxígeno disuelto en el tanque de aeración son muy importantes para la operación; si el oxígeno disuelto es muy bajo, se inhibirá la actividad microbiana y la remoción de materia orgánica disminuirá. Una caída brusca del OD indica que una gran

cantidad de materia orgánica ingresó al sistema, por lo que se recomienda tener oxígeno disuelto residual de 1 a 2 mg/L en el reactor biológico. (CONAGUA, 2019).

El promedio obtenido de oxígeno disuelto en el reactor aerobio fue de  $1.78 \pm 0.38$  mg/L, este valor se considera adecuado al estar dentro del rango recomendado, como se observa en la Gráfica 6-1. Las variaciones o picos que se observan del oxígeno disuelto son debido a la concentración de materia orgánica en el agua residual ya que al aumentar esta los microorganismos necesitan más oxígeno y cuando disminuye el oxígeno residual aumenta. A partir del día 70 se observa una tendencia ascendente de del OD esto se debe a que la actividad microbiana disminuyó y por lo tanto no estaban utilizando el oxígeno lo cual tiene relación la disminución de la temperatura que se discutirá más adelante en la sección 6.1.3.

En un tanque anóxico se da el proceso de desnitrificación por lo que se debe mantener concentraciones bajas o nulas de oxígeno para que las bacterias desnitrificantes puedan transformar el nitrógeno oxidado en nitrógeno molecular y este se libere a la atmosfera logrando así su eliminación del agua.

Para el reactor anóxico se recomienda mantener un oxígeno disuelto preferentemente menor a 0.20 mg/L, en este caso el promedio obtenido fue de  $0.27 \pm 0.05$  mg/L (Gráfica 6-1). El valor más alto obtenido fase anóxica fue de 0.36 mg/L, la mayoría de los valores se mantuvieron menores a 0.30 mg/L por lo que se logra ver una tendencia un poco estable.



**Gráfica 6-1. Oxígeno disuelto en el reactor biológico**

### 6.1.2 pH

Para asegurar la actividad y el desarrollo de los microorganismos que son de interés en el proceso de lodos activados, es indispensable que el agua residual a tratar, así como el sistema en el tanque de aeración se mantenga un pH entre 6.0 y 8.5 unidades, aunque las bacterias pueden sobrevivir en el rango de pH entre 5.0 y 10.0 pero no reproducirse. Recordando que en condiciones extremas por arriba o por abajo del rango de 5.0 a 10.0, la población biológica de interés para el proceso morirá. (CONAGUA, 2019).

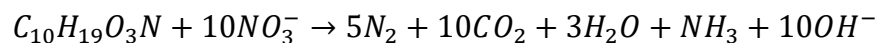
En la Gráfica 6-2 se observan los resultados de pH para el reactor anóxico y el aerobio. El pH en los reactores se mantuvo dentro del intervalo óptimo para la vida y reproducción los microorganismos, teniendo un promedio de pH de  $7.12 \pm 0.29$  unidades en el reactor anóxico y para el reactor aerobio de  $6.94 \pm 0.26$  unidades.

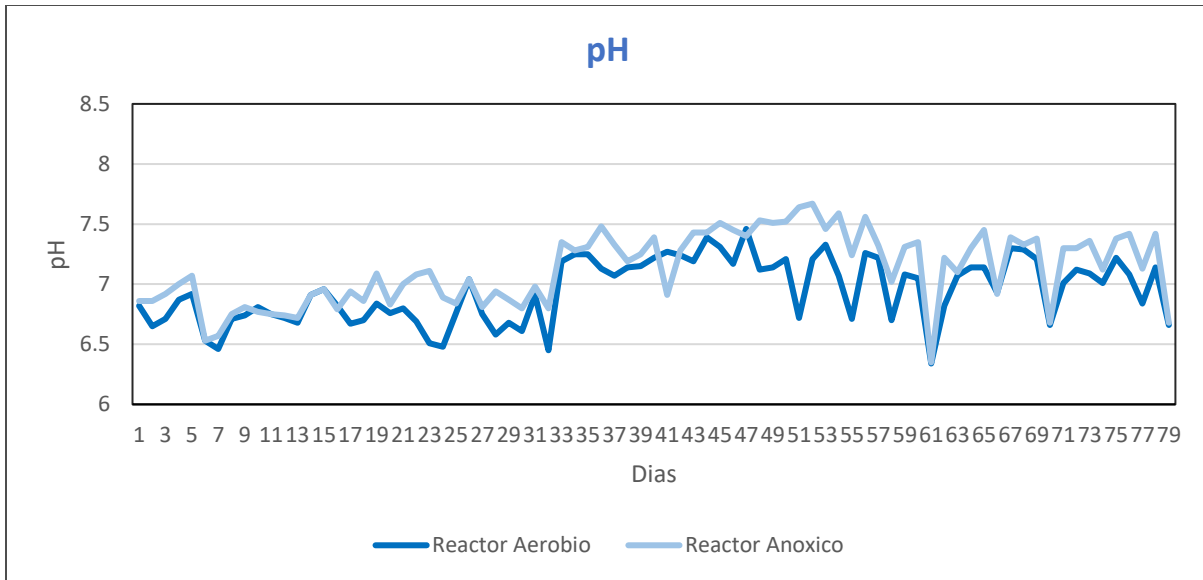
Los valores de pH se mantuvieron más cercanos al límite inferior, los picos más notables estuvieron por debajo de 6.5 unidades, recordando que el pH del suplemento adicionado está en un rango de 6 a 7.5 unidades por lo que se puede notar su influencia de este en agua residual. Hasta el día 33 el pH fue menor a 7, a partir de ahí se observa un incremento en el pH mayormente en el reactor anóxico esto se debe proceso de desnitrificación donde se producen iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) los cuales elevan el pH y en la nitrificación se liberan protones ( $\text{H}^+$ ) debido a esto tiende a disminuir el pH en el reactor aerobio.

Reacción de nitrificación



Reacción de desnitrificación



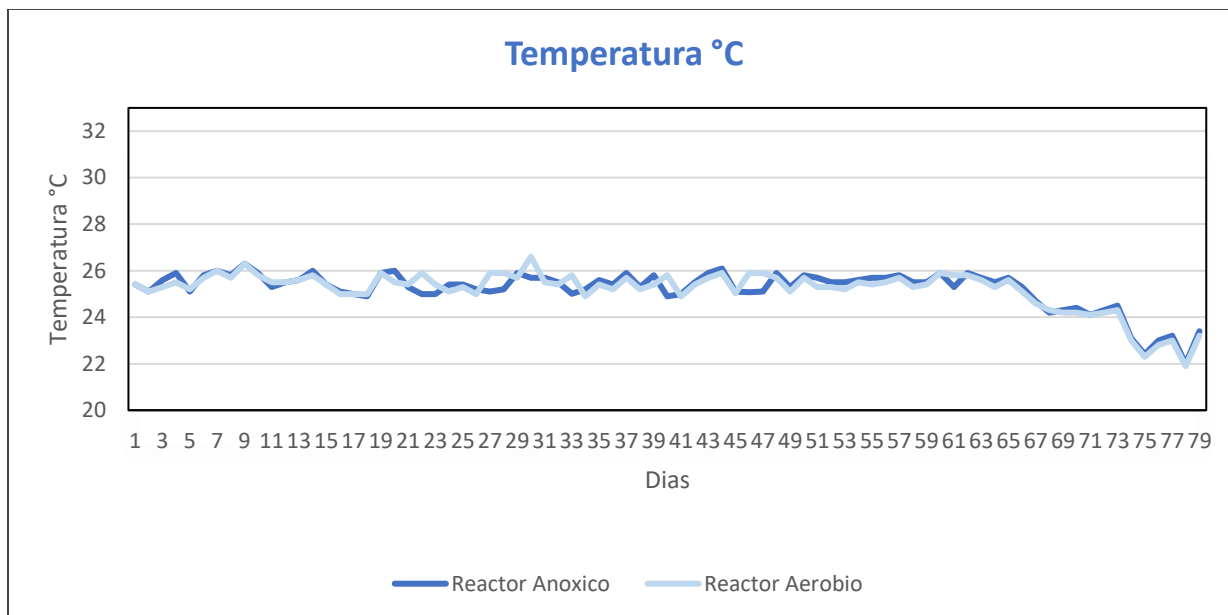


**Gráfica 6-2. pH en el reactor biológico**

### 6.1.3 Temperatura (T)

Un rango óptimo de temperatura para la actividad bacteriana es entre 25 °C y 32 °C. A altas temperaturas las bacterias se vuelven más activas, inversamente a menor temperatura menor actividad microbiana. Es necesario tomar en cuenta que el agua residual no debe exceder una temperatura de 35 °C, ni ser menor de 15 °C. (CONAGUA, 2019). Una temperatura mayor a 35 °C excedería el límite máximo permisible también reduce la actividad microbiana así mismo menor a 15 °C los microorganismos se vuelven inactivos.

La temperatura promedio obtenida en el reactor anóxico fue de  $25.21 \pm 0.83$  °C y para el reactor aerobio  $25.19 \pm 0.86$  °C. La temperatura del reactor estuvo cerca del límite inferior de la recomendada para una actividad microbiana favorable. Pero a partir del día 65 se de presentar una caída de la temperatura por el inicio de la estación de invierno (Gráfica 6-3), registrándose valores de hasta 22 °C. Esto genero una reducción en la actividad metabólica de los microorganismos, afectando la calidad del efluente.



**Gráfica 6-3. Temperatura en el reactor biológico**

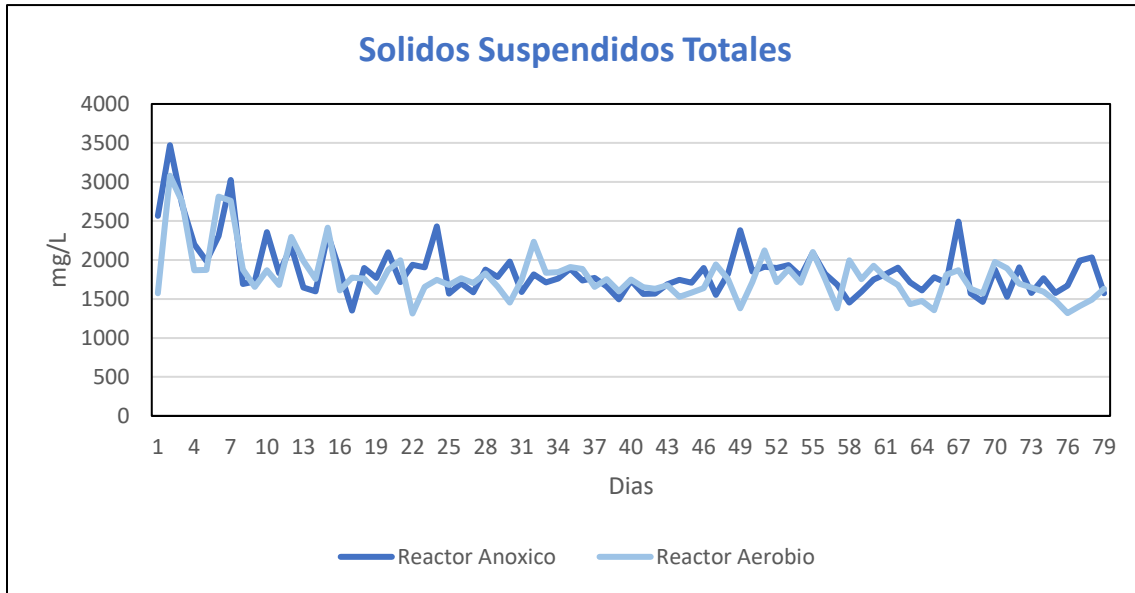
### 6.1.4 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Las concentraciones de los SST se emplean para calcular los indicadores de control, tales como la relación alimento-microorganismos (A/M) y el tiempo de retención medio celular (TRMC), el cual a su vez es usado para calcular los niveles requeridos de sólidos suspendidos totales en el licor mezclado (SSTLM), y para hacer ajustes periódicos a la recirculación y a la purga de lodos (CONAGUA, 2019).

La concentración de SST dentro del reactor biológico, como se mencionó anteriormente, debe estar alrededor de 1800 mg/L. En la Gráfica 6-4 se observa que la mayoría de los resultados de SST oscilaron entre los 1400 mg/L a 2100 mg/L, intervalo que es bastante amplio, observándose grandes variaciones al inicio, que con el paso del tiempo fueron disminuyendo. Estas variaciones fueron ocasionadas por una falta de SST, porque durante la tarde noche la recirculación de lodos se interrumpía y por la mañana se regresaban los SST rápidamente al reactor biológico, lo que incrementaba abruptamente su concentración en ellos.

En este sentido, se observaba, por las mañanas un alto nivel de lodos en el sedimentador secundario, donde la acumulación se puede deber a un alto

espesamiento o a un sólido pequeño, que obstruían la salida de lodo, y por lo tanto se frenaba la recirculación de los SST hacia el reactor biológico.



**Gráfica 6-4. SST del reactor biológico**

Para solucionarlo se realizaron algunas de las siguientes acciones:

- **Remover los lodos del clarificador:** Con la introducción de un tubo delgado hasta el fondo del clarificador se removían los lodos.
- **Aumento del caudal de recirculación:** Al aumentar el caudal de recirculación de lodo 10 veces más de lo establecido por un periodo de tiempo de  $\pm 10$  min hasta observar que la mayoría de los lodos estuvieran de retorno en la fase anóxica.
- **Cambio de mangueras:** Si ninguna de las acciones anteriores funcionaba, el problema era causado por una obstrucción en las mangueras, por lo que se realizaba un cambio éstas, desde la válvula inferior del clarificador hasta la bomba y de ésta al reactor.

Una vez corregido este problema se tomaba la muestra del licor mezclado, se determinaba los SST y se monitoreaba el sistema hasta que estuviera estable nuevamente.



El promedio de SST que se obtuvo en el reactor anóxico fue de  $1862.75 \pm 350.62$  mg/L en el caso del reactor aerobio el promedio fue de  $1787.39 \pm 324.33$  mg/L, concentraciones muy cercanas a lo establecido.

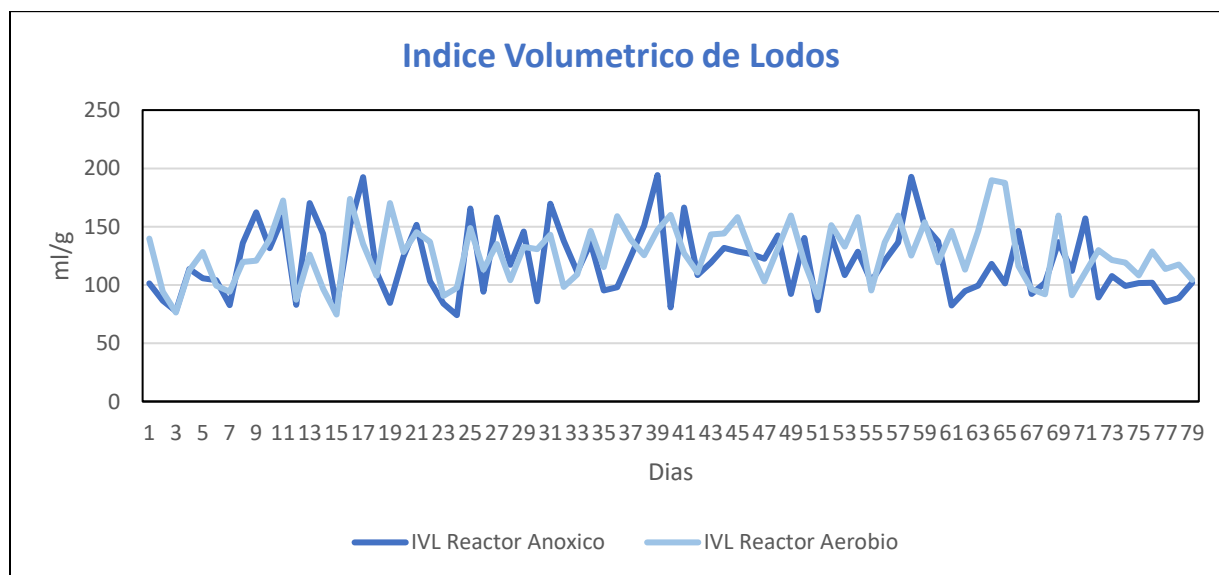
### 6.1.5 Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

Los valores típicos de IVL para lodos de buenas características de sedimentación están comprendidos dentro del intervalo de 150 a 35 mL/g, con concentraciones de 800 a 3500 mg/L (CONAGUA, 2019).

El IVL promedio para el reactor anóxico fue de  $123.29 \pm 29.96$  mL/g y para el reactor aerobio el promedio fue de  $128.85 \pm 25.44$  mL/g, a pesar de las variaciones el promedio se encuentra dentro de lo adecuado.

Como se observa en la Gráfica 6-5, la mayoría de los resultados estuvieron dentro de intervalo típico, aunque también se aprecian picos que sobrepasan los 150 mL/g, esto puede deberse a problemas de recirculación, que ya se explicó con anterioridad.

A partir del día 71 hay una tendencia descendente del IVL, esto tiene relación con la caída de la temperatura, que se discutió anteriormente, debido a que los microorganismos reducen su actividad y probablemente esto mejoró su sedimentabilidad al obtenerse valores más estables, lo que reduce el IVL.



Gráfica 6-5. IVL del reactor biológico

### 6.1.6 Purga de lodos

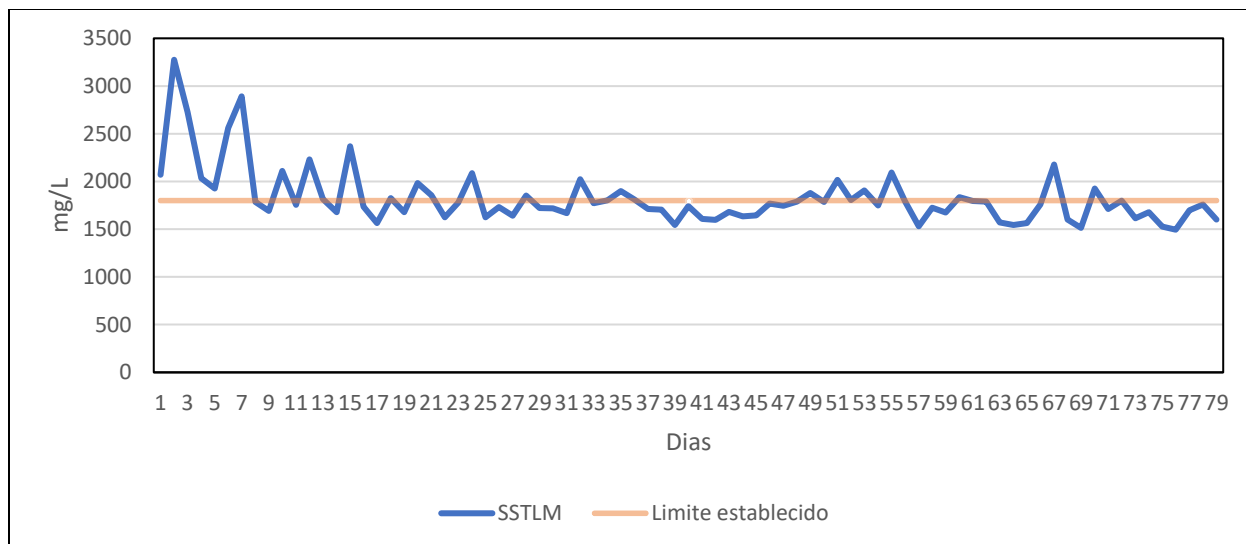
El proceso de lodos activados se basa en la oxidación de materia orgánica mediante microorganismos, los cuales continuamente se están reproduciendo y desarrollando. Por lo que, es necesario purgar diariamente el lodo en exceso que se ha producido. Además, esto permite que los microorganismos permanezcan en una edad adecuada, es decir maduros, para desempeñar bien su actividad de degradación de materia orgánica. Esto hace que el control de la purga sea la primera herramienta de operación de una planta de lodos activados (CONAGUA).

A lo largo del periodo de prueba se realizaron purgas cada que se obtenía un incremento igual o mayor a 2000 mg/L en los SST del reactor biológico. Cabe mencionar que éstas se realizaron a partir del día 6, en total se hicieron 9 purgas al sistema, las cuales se presentan en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1. Purgas realizadas en el sistema de lodos activados**

Fecha	Litros
24/08/2022	15.49
29/08/2022	6.06
31/08/2022	7.94
05/09/2022	9.86
19/09/2022	5.65
29/09/2022	4.56
27/10/2022	4.43
03/11/2022	5.78
22/11/2022	7.12

En la Gráfica 6-6 .Se puede apreciar los días en los que los SST en el reactor biológico sobrepaso o estuvo cerca de los 2000 mg/L. A partir del día 71 ya no se realizaron purgas debido a que la actividad microbiana se redujo por el descenso de la temperatura, lo que ocasiona que el metabolismo de los microorganismos disminuya.



**Gráfica 6-6. Límite de SST**

## 6.2 Análisis de las determinaciones analíticas

### 6.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

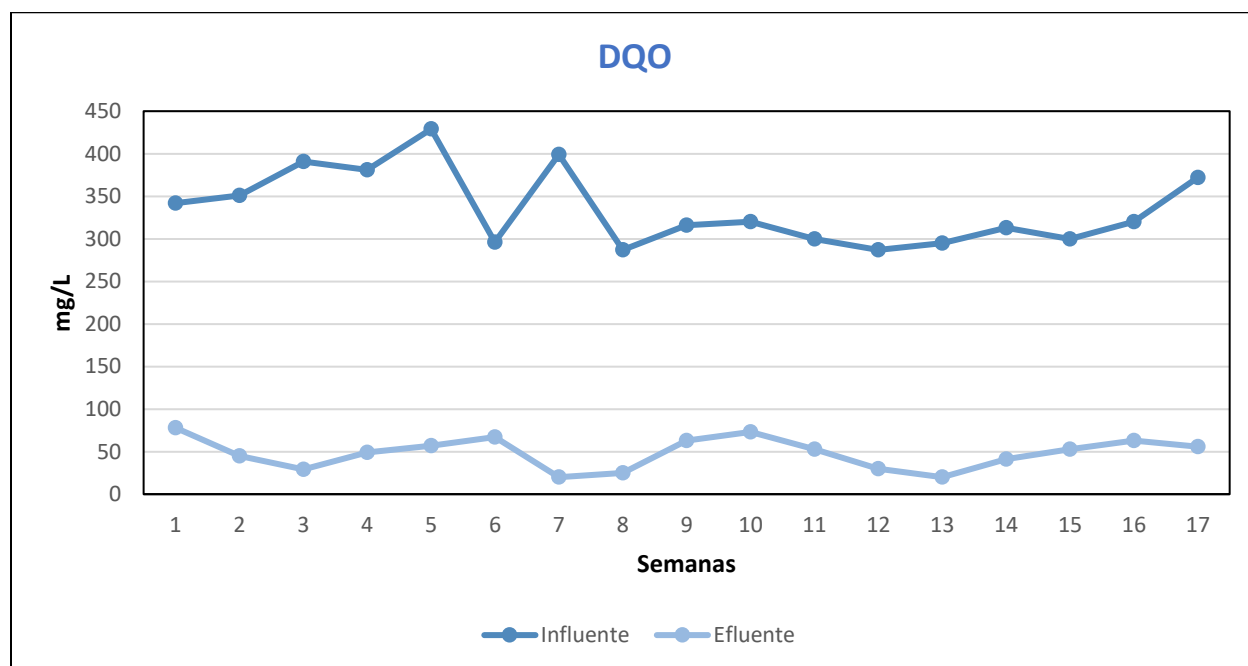
En la Tabla 6.2 se muestran los resultados de los análisis semanales de DQO en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.2. Resultados del análisis de la DQO**

Fecha	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Eficiencia remoción %
17/8/2022	342	78	77.19
24/8/2022	351	45	87.18
31/8/2022	391	29	92.58
7/9/2022	381	49	87.14
14/9/2022	429	57	86.71
21/9/2022	296	67	77.36
28/9/2022	399	20	94.99
5/10/2022	287	25	91.29
12/10/2022	316	63	80.06
19/10/2022	320	73	77.19
27/10/2022	300	53	82.33
3/11/2022	287	30	89.55
9/11/2022	295	20	93.22
16/11/2022	313	41	86.90
23/11/2022	300	53	82.33
30/11/2022	320	63	80.31
7/12/2022	372	56	84.95
<b>Promedios</b>	<b>335</b>	<b>48</b>	<b>85.37</b>

Con la adición del producto PB8055 se espera una DQO de 400 mg/L. Los resultados muestran que la concentración mínima en el influente, con la adición del producto, fue de 287 mg/L y la máxima de 439 mg/L, el promedio de DQO fue de  $335 \pm 44.25$  mg/L. La mayoría de los resultados de DQO fueron menores al esperado.

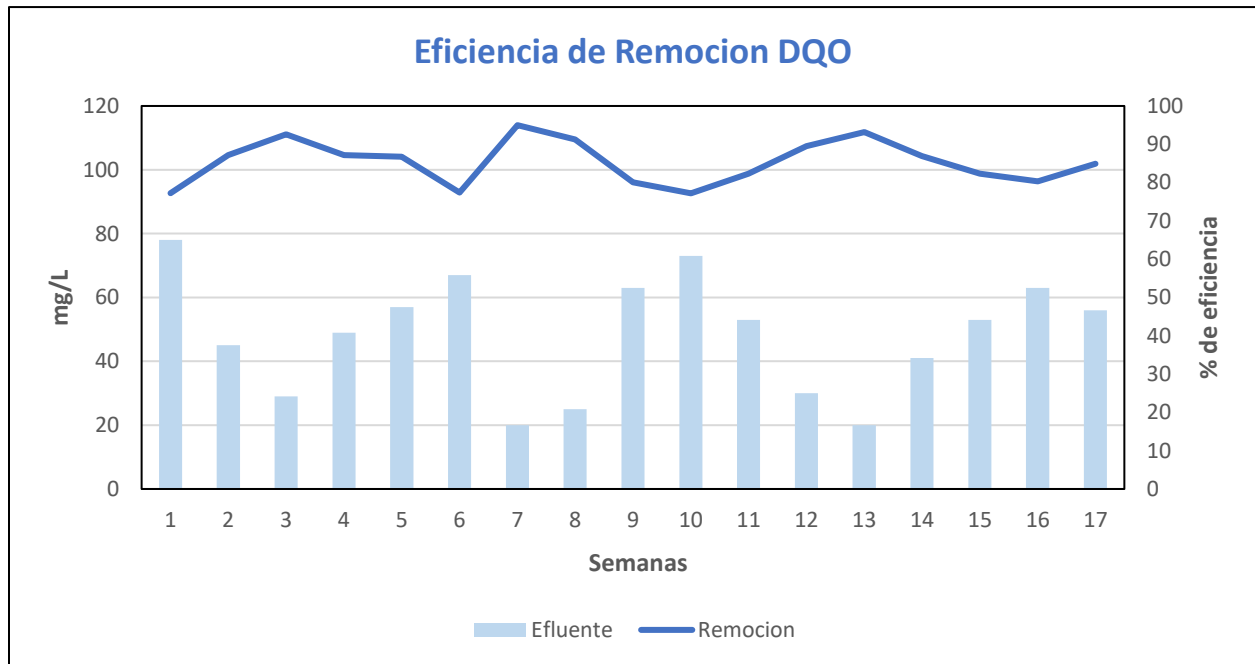
Para el influente se observó en las primeras tres semanas una tendencia ascendente de la DQO, en la semana cinco y siete se resaltan dos picos, con concentraciones de 429 y 399 mg/L respectivamente. Posterior a eso se puede decir que de la semana ocho hasta la catorce se obtuvo un comportamiento más estable con concentraciones cercanas a 300mg/L, por último, de la semana quince a la diecisiete nuevamente se observa una tendencia ascendente (Gráfica 6-7).



**Gráfica 6-7. Tendencia del influente y efluente DQO**

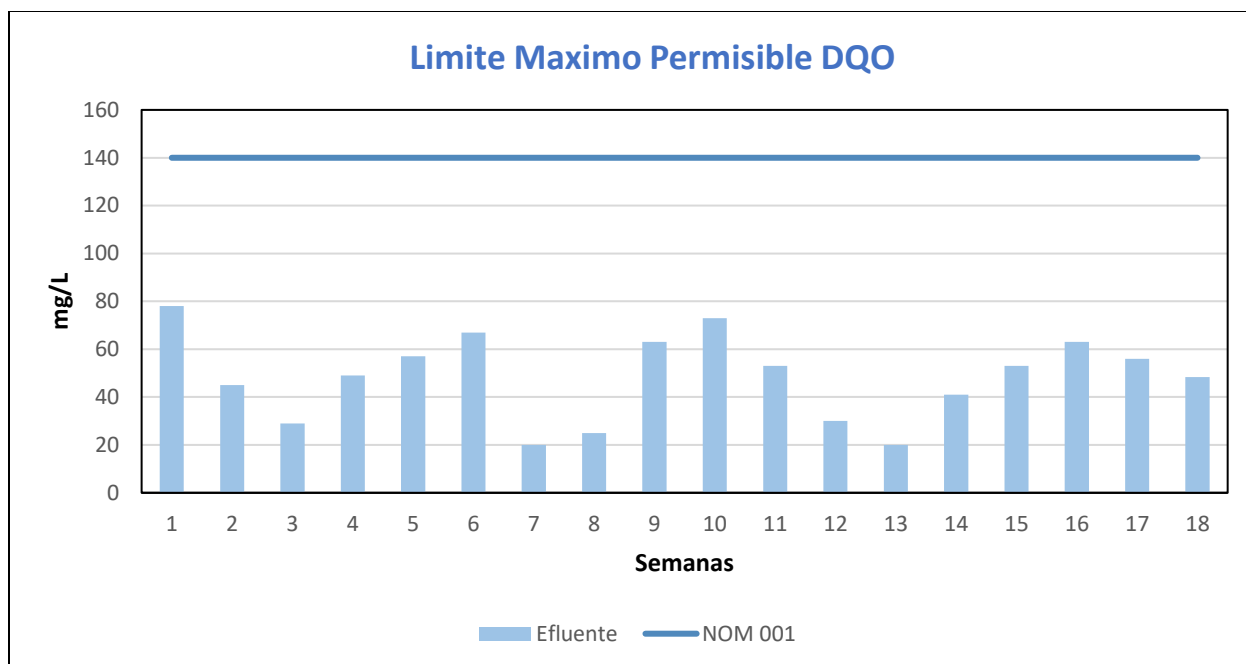
Para el efluente la DQO promedio fue de  $48 \pm 18.31$  mg/L, la mayor concentración de DQO se observó en la primera semana con 78 mg/L, esto fue porque el sistema aún se estaba estabilizando y los microorganismos tienen que adaptarse a la nueva fuente de carbono, en la semana diez se presenta el segundo valor más alto de DQO con una concentración de 73 mg/L. En las demás semanas se obtuvo un valor menor o cercano a 50 mg/L. A partir de la semana quince, se presentó una tendencia ascendente debido

a la disminución de la actividad microbiana, producto de un descenso de la temperatura (Gráfica 6-7).



**Gráfica 6-8. Eficiencia de remoción de DQO**

En la Gráfica 6-8 se puede observar la eficiencia de remoción de DQO. Se establece que, para un agua residual municipal tratada, por un proceso biológico, la DQO del efluente debe estar alrededor de los 50 mg/L, o tener una eficiencia de remoción del 85% (Moeller, y otros, 2011), en este sentido en la Tabla 6.2, en promedio la DQO del efluente fue de 48 mg/L, con una remoción del 85%, por lo que se puede establecer que el proceso fue eficiente en la estabilización de la materia orgánica. Las remociones de DQO fluctuaron entre 77.19% y 94.99% con una eficiencia de remoción promedio de 85.37%.



**Gráfica 6-9. Límite máximo permisible DQO**

Con base a la NOM-001-SEMARNAT-2021, el límite máximo permisible para descarga en embalses, lagos y lagunas es de 140 mg/L, por lo que se puede decir que los resultados están cumpliendo de manera correcta esta normativa (Gráfica 6-9).

### 6.2.2 Remoción de Fosforo Total (PT)

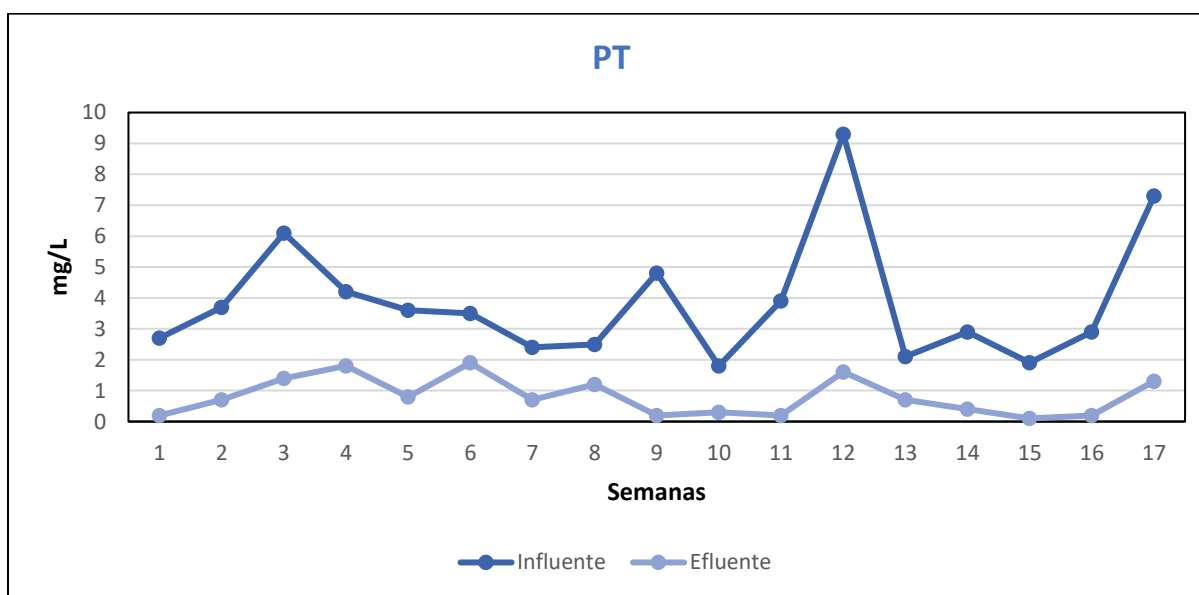
En la Tabla 6.3 se muestran los resultados de los análisis semanales de PT en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.3. Resultados de los análisis de PT**

Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia Remoción %
17/8/2022	2.7	0.2	92.59
24/8/2022	3.7	0.7	81.08
31/8/2022	6.1	1.4	77.05
7/9/2022	4.2	1.8	57.14
14/9/2022	3.6	0.8	77.78
21/9/2022	3.5	1.9	45.71
28/9/2022	2.4	0.7	70.83
5/10/2022	2.5	1.2	52.00
12/10/2022	4.8	0.2	95.83
19/10/2022	1.8	0.3	83.33
27/10/2022	3.9	0.2	94.87

Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia Remoción %
3/11/2022	9.3	1.6	82.80
9/11/2022	2.1	0.7	66.67
16/11/2022	2.9	0.4	86.21
23/11/2022	1.9	0.1	94.74
30/11/2022	2.9	0.2	93.10
7/12/2022	7.3	1.3	82.19
<b>Promedio</b>	<b>3.86</b>	<b>0.81</b>	<b>78.47</b>

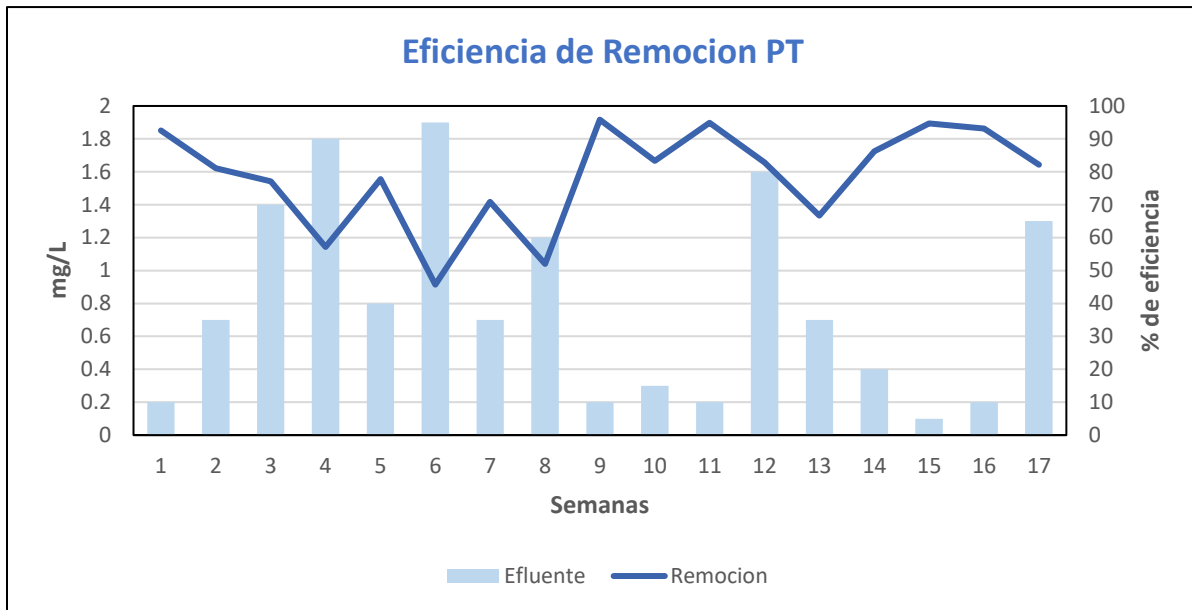
La concentración promedio de PT en el influente fue de  $3.86 \pm 2.03$  mg/L, con una concentración mínima de 1.8 mg/L, una máxima de 9.3 mg/L. En Gráfica 6-10 se presenta la tendencia del PT, en las primeras tres semanas se notó un incremento de PT hasta 6.1 mg/L, en la semana cuatro a la ocho se observa una disminución alrededor de 2 a 4 mg/L, el pico más alto se presentó en la semana doce con 9.3 mg/L, a partir de ésta hay un decremento, hasta la última donde se muestra un segundo pico de 7.3 mg/L.



**Gráfica 6-10. Tendencia del influente y efluente para PT**

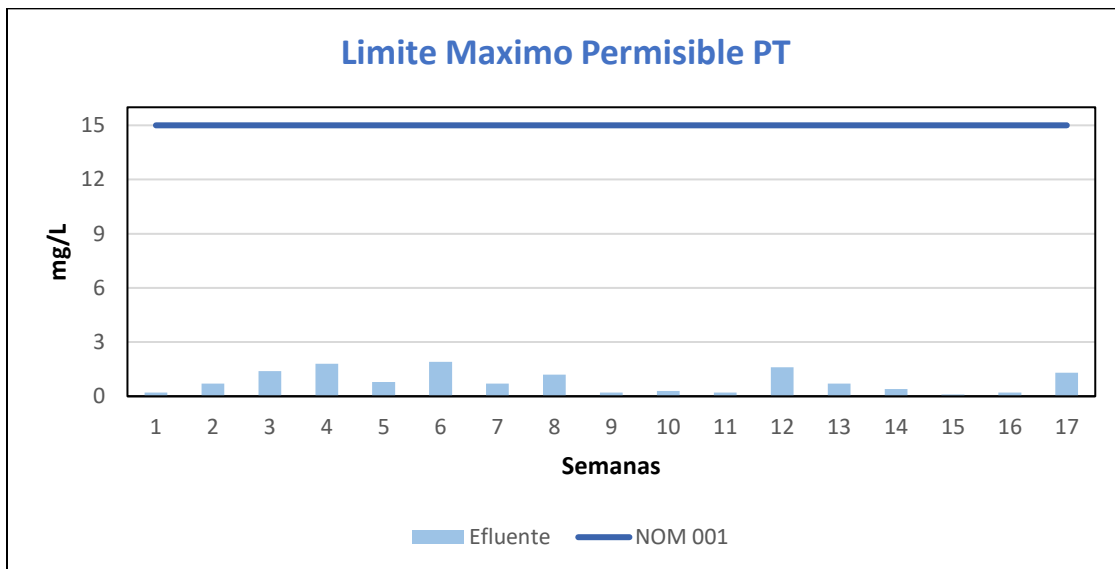
Respecto al efluente los valores se mantuvieron cercanos 0 y menor a 2 mg/L, con una concentración promedio de  $0.81 \pm 0.61$ . En la semana uno a la cuatro se presenta una tendencia ascendente con una concentración de hasta 1.8 mg/L. En la semana cuatro,

en la seis y en la doce se obtuvieron los valores más altos de PT, 1.8, 1.9 y 1.6 mg/L, respectivamente (Gráfica 6-10).



**Gráfica 6-11. Eficiencia de remoción PT**

El valor promedio de eficiencia de remoción de PT fue de 78.47%, con un valor mínimo del 45.71% y un máximo del 95.83% (Gráfica 6-11). Una remoción de PT se considera correcta si por lo menos se obtiene un 80% de eficiencia, como el promedio es muy cercano a este valor se considera adecuado.



**Gráfica 6-12. Límite máximo permisible de PT**



En base a lo establecido por la NOM 001 SEMARNAR 2021, el límite máximo permisible de PT en descargas a embalses, lagos y lagunas es de 15 mg/L. Los resultados del agua residual tratada se encuentran debajo del límite permisible (Gráfica 6-12).

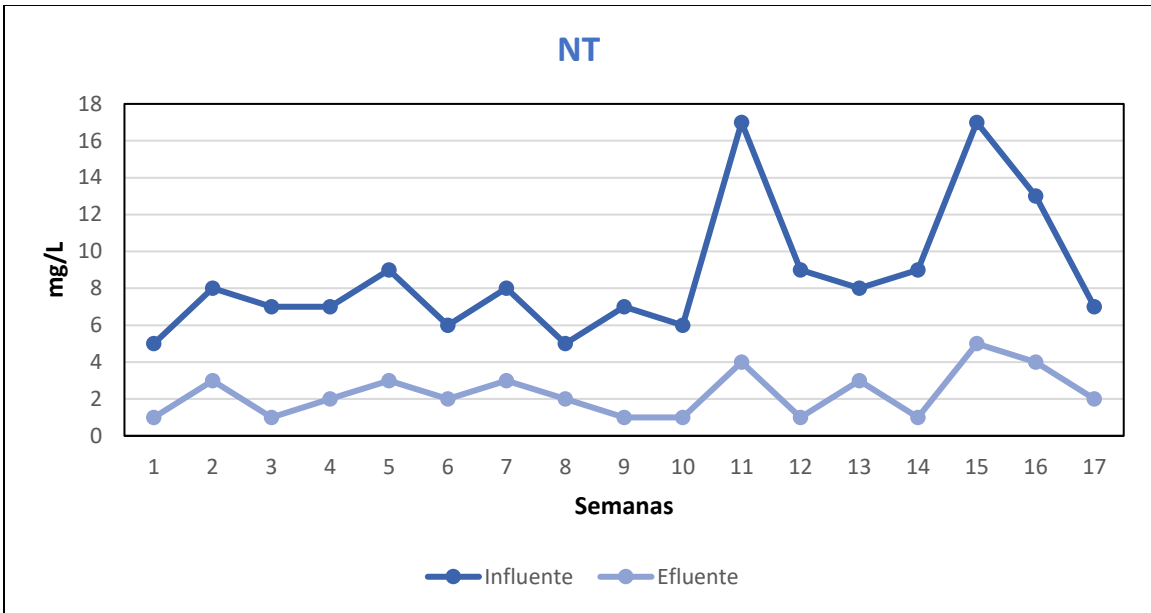
### 6.2.3 Remoción de Nitrógeno Total (NT)

En la Tabla 6.4 se muestran los resultados de los análisis semanales de NT en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.4. Resultados de los análisis de NT**

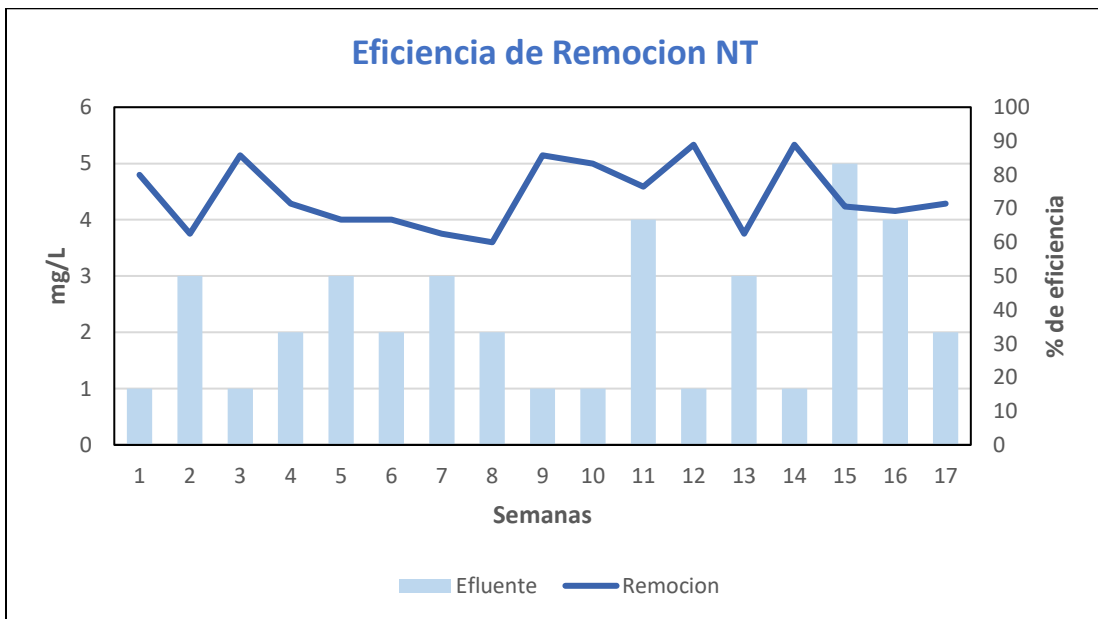
Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia remoción %
17/8/2022	5	1	80.00
24/8/2022	8	3	62.50
31/8/2022	7	1	85.71
7/9/2022	7	2	71.43
14/9/2022	9	3	66.67
21/9/2022	6	2	66.67
28/9/2022	8	3	62.50
5/10/2022	5	2	60.00
12/10/2022	7	1	85.71
19/10/2022	6	1	83.33
27/10/2022	17	4	76.47
3/11/2022	9	1	88.89
9/11/2022	8	3	62.50
16/11/2022	9	1	88.89
23/11/2022	17	5	70.59
30/11/2022	13	4	69.23
7/12/2022	7	2	71.43
<b>Promedios</b>	<b>8.71</b>	<b>2.29</b>	<b>73.68</b>

La concentración promedio del influente fue de  $8.71 \pm 3.63$  mg/L. En la Gráfica 6-13 se observa la tendencia del efluente y desde la primera semana hasta la semana diez, los valores oscilaron alrededor de 5 y 8 mg/L. En la semana once y quince se obtuvieron dos picos con una concentración de 17 mg/L, entre estos se observa una tendencia descendente hasta 8 mg/L.



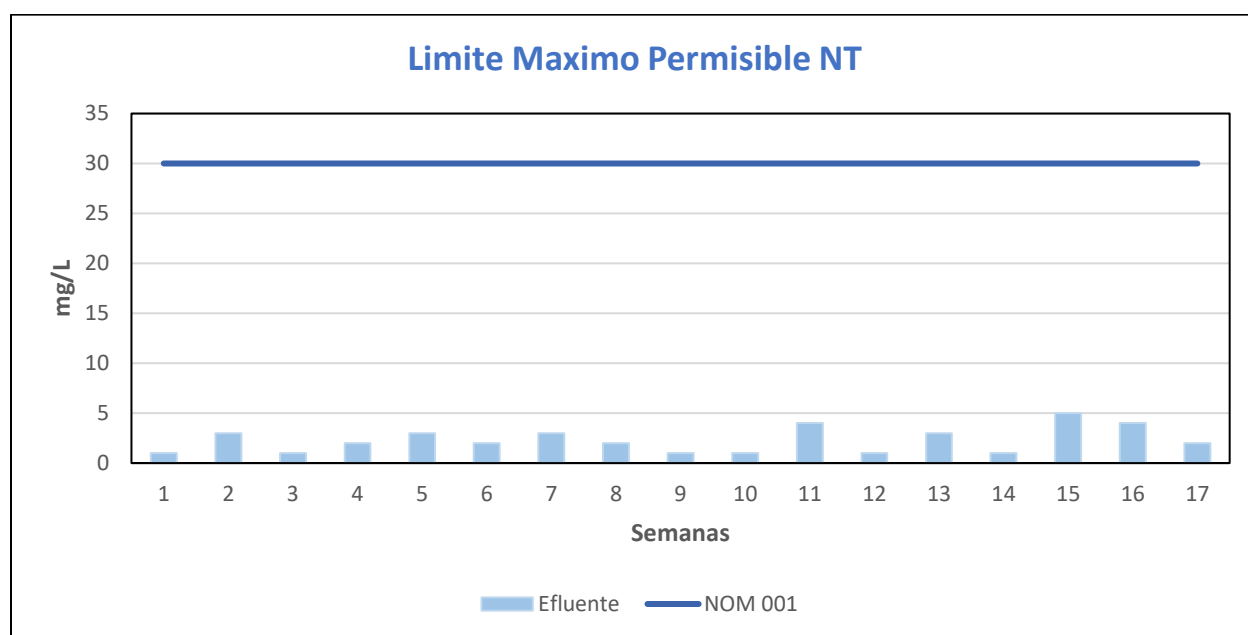
**Gráfica 6-13. Tendencia del influente y efluente para NT**

En el efluente se obtuvo un promedio de  $2.29 \pm 1.26$  mg/L. Las concentraciones más grandes obtenidas se dieron en la semana once y quince con 4 y 5 mg/L, para el resto de las semanas se obtuvieron concentraciones menores o iguales a 3 mg/L (Gráfica 6-13).



**Gráfica 6-14. Eficiencia de remoción de NT**

El valor promedio de eficiencia registrado fue de 73.68%, la máxima eficiencia fue del 88.89% y la mínima de 62.50 % (Gráfica 6-14). Para considerar que el sistema logro una eficiencia de remoción esta debe ser mayor a 70% (Moeller, y otros, 2011), por lo anterior se puede decir que en promedio el sistema si eliminó el nitrógeno de manera eficiente.



**Gráfica 6-15. Límite máximo permisible de NT**

La NOM 001 SEMAMRNAT 2021, dice que el valor máximo permisible para NT es 30 mg/L, en descargas a embalses, lagos y lagunas. En los resultados obtenidos del influente se observa en la Gráfica 6-15 que si se está cumpliendo con dicha normativa.

### 6.2.4 Remoción de Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>3</sub>)

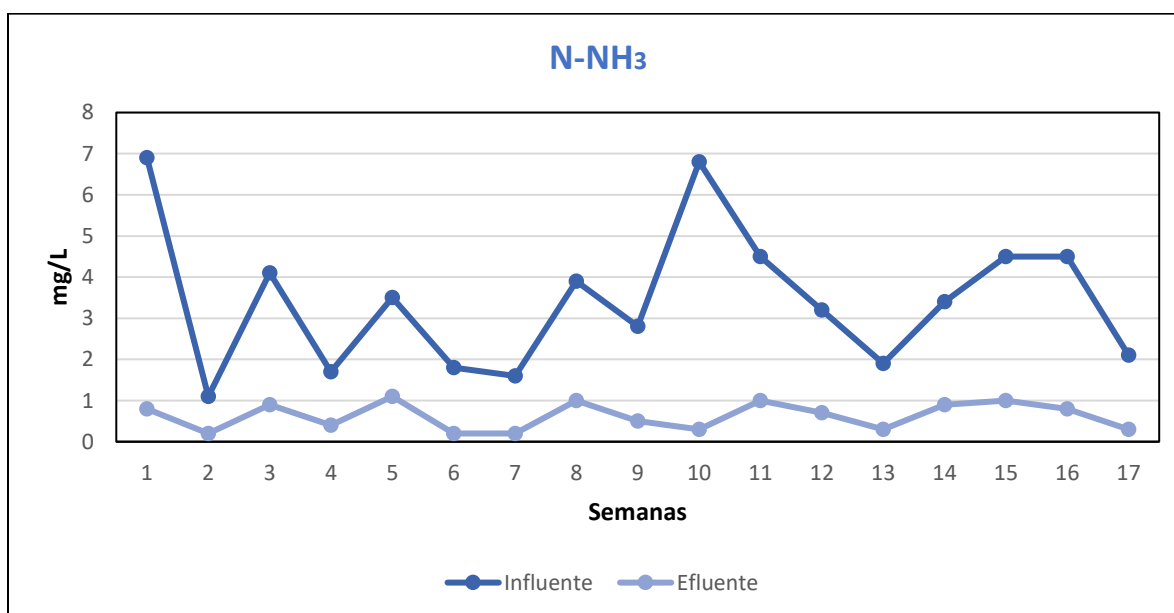
En la Tabla 6.5 se muestran los resultados de los análisis semanales de N-NH<sub>3</sub> en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.5. Resultados de los análisis de Nitrógeno Amoniacal**

Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia remoción %
17/8/2022	6.9	0.8	88.41
24/8/2022	1.1	0.1	81.82
31/8/2022	4.1	0.9	78.05
7/9/2022	1.7	0.4	76.47
14/9/2022	3.5	1.1	68.57

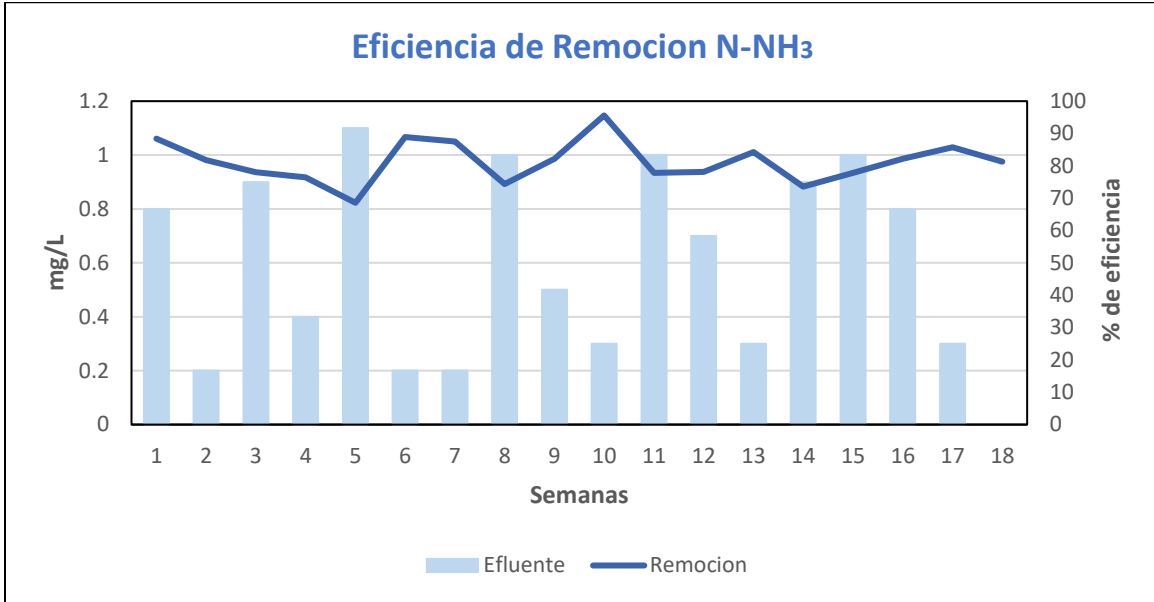
Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia remoción %
21/9/2022	1.8	0.2	88.89
28/9/2022	1.6	0.2	87.50
5/10/2022	3.9	1	74.36
12/10/2022	2.8	0.5	82.14
19/10/2022	6.8	0.3	95.59
27/10/2022	4.5	1	77.78
3/11/2022	3.2	0.7	78.13
9/11/2022	1.9	0.3	84.21
16/11/2022	3.4	0.9	73.53
23/11/2022	4.5	1	77.78
30/11/2022	4.5	0.8	82.22
7/12/2022	2.1	0.3	85.71
<b>Promedios</b>	<b>3.43</b>	<b>0.62</b>	<b>81.24</b>

En el influente el valor promedio de N-NH<sub>3</sub> fue de 3.43 ± 1.70 mg/L, en la primera semana se obtuvo la máxima concentración de 6.9 mg/L y en la segunda semana la concentración mínima de 1.1 mg/L. En la Gráfica 6-16, se observa que la mayoría de los resultados oscilaron entre 1.5 y 4 mg/L, a excepción de la primer y la décima semana con concentraciones de 6.9 y 6.8 mg/L.



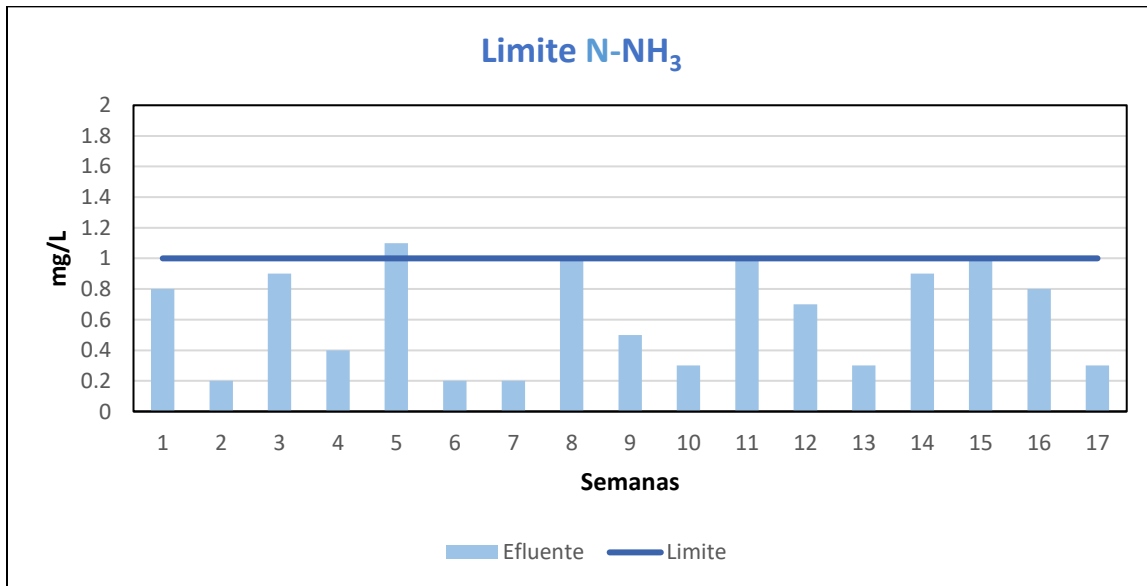
**Gráfica 6-16. Tendencia del influente y efluente para N-NH<sub>3</sub>**

Para el efluente de N-NH<sub>3</sub> se obtuvo un promedio de 0.62 ± 0.33 mg/L. Como se observa en la Gráfica 6-16, las concentraciones del efluente oscilaron alrededor de 1 mg/L.



**Gráfica 6-17. Eficiencia de remoción N-NH<sub>3</sub>**

La eficiencia de remoción establecida debe ser por lo menos del 80%. Con base a los resultados, la eficiencia de remoción promedio de N-NH<sub>3</sub> fue del 81.94%, por lo que la eliminación de N-NH<sub>3</sub> se llevó a cabo de forma esperada (Gráfica 6-17).



**Gráfica 6-18. Límite establecido de N-NH<sub>3</sub>**

A pesar de que el nitrógeno amoniacal no está normado, su eliminación es parte importante del proceso de lodos activados. Como se sabe, en el proceso de nitrificación el amoniaco es oxidado a nitratos, y si éste se desarrolla adecuadamente, la concentración esperada en el efluente de amoniaco debe estar por debajo de 1 mg/L. En la Gráfica 6-18 se observa que solo en la semana cinco, la cual tuvo una concentración de 1.1 mg/L no se cumple con el criterio.

### 6.2.5 Remoción de Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

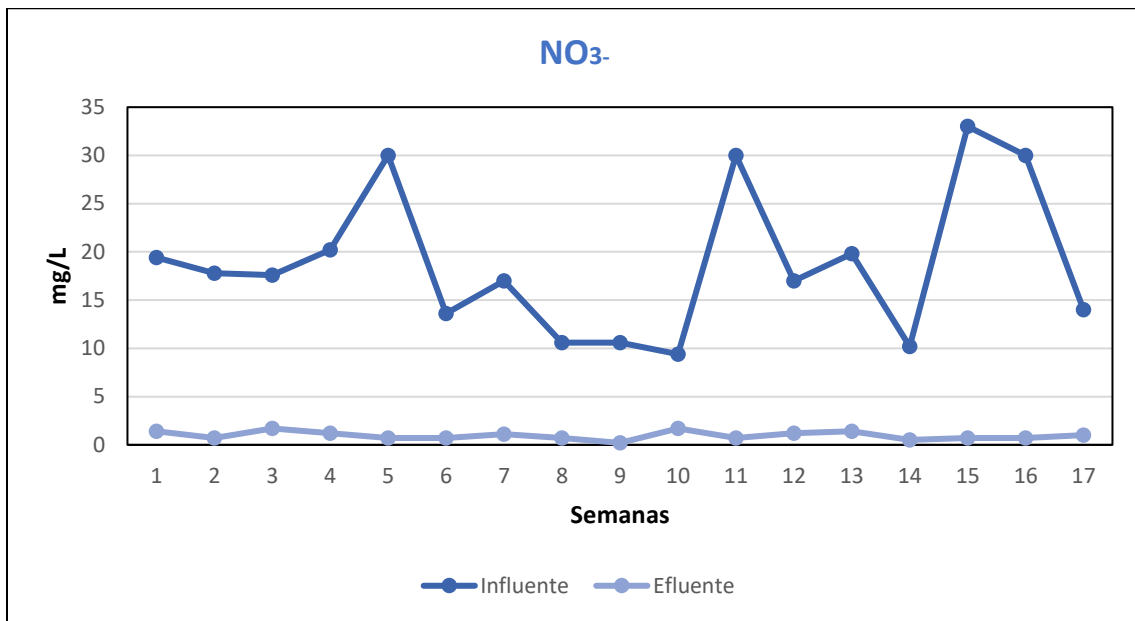
En la Tabla 6.6 se muestran los resultados de los análisis semanales de  $\text{NO}_3^-$  en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.6. Resultados de análisis para Nitratos**

Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia Remoción %
17/8/2022	19.4	1.4	92.78
24/8/2022	17.8	0.7	96.07
31/8/2022	17.6	1.7	90.34
7/9/2022	20.2	1.2	94.06
14/9/2022	30	0.7	97.67
21/9/2022	13.6	0.7	94.85
28/9/2022	17	1.1	93.53
5/10/2022	10.6	0.7	93.40
12/10/2022	10.6	0.2	98.11
19/10/2022	9.4	1.7	81.91
27/10/2022	30	0.7	97.67
3/11/2022	17	1.2	92.94
9/11/2022	19.8	1.4	92.93
16/11/2022	10.2	0.5	95.10
23/11/2022	33	0.7	97.88
30/11/2022	30	0.7	97.67
7/12/2022	14	1	92.86
<b>Promedios</b>	<b>18.84</b>	<b>0.96</b>	<b>94.10</b>

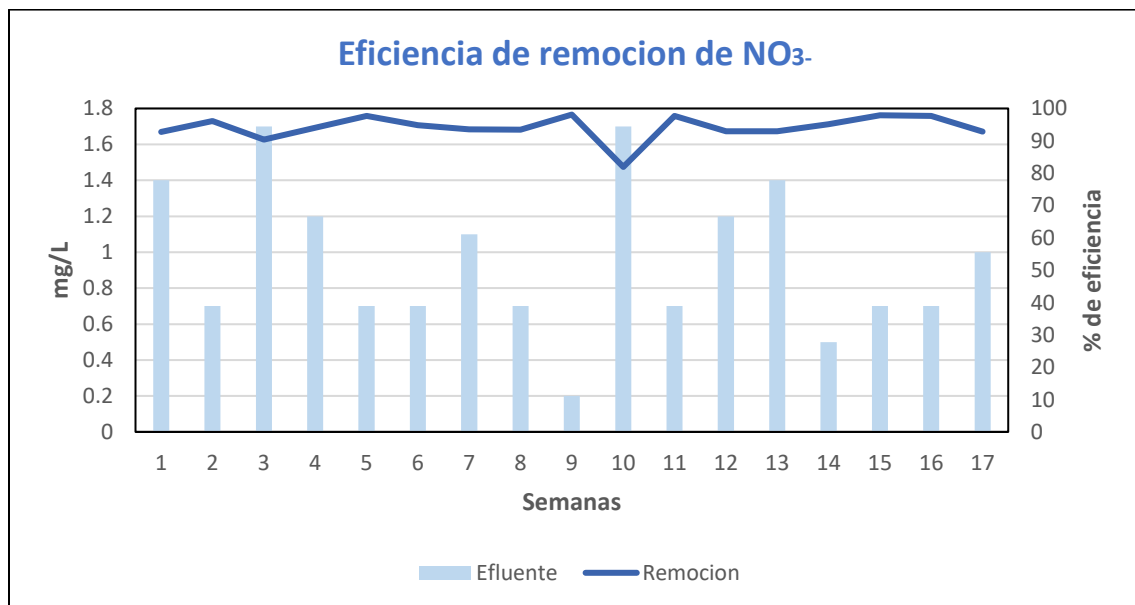
La concentración promedio de  $\text{NO}_3^-$  en el influente fue  $18.84 \pm 7.65$  mg/L, con una máxima de 33 mg/L y una mínima de 10.2 mg/L. En la Gráfica 6-19, se observa que de la semana uno a la cinco se presenta una tendencia ascendente con una concentración hasta de 30 mg/L. También se observan tres picos en la semana cinco, once y quince

con concentraciones de 30 a 33 mg/L, las menores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  se dieron en las semanas ocho, nueve, diez y catorce, estas oscilaron desde los 9.4 a 10.6 mg/L.



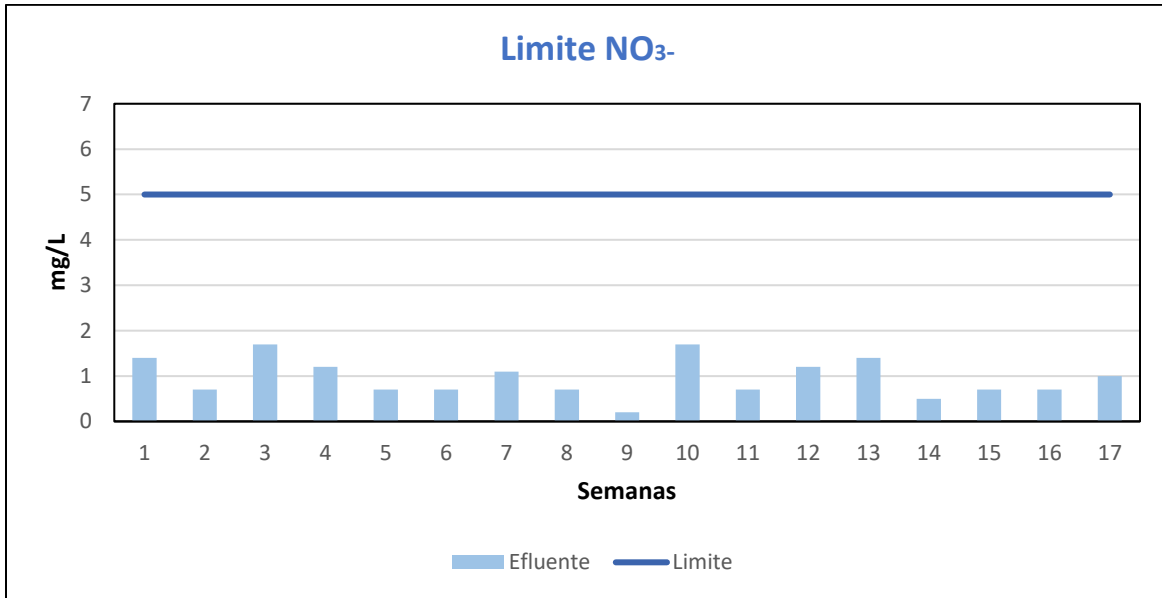
**Gráfica 6-19. Tendencia del influente y efluente para  $\text{NO}_3^-$**

En el efluente la concentración promedio de  $\text{NO}_3^-$  fue de  $0.96 \pm 0.42$  mg/L. En todas las semanas las concentraciones se mantuvieron menores a 2 mg/L (Gráfica 6-19).



**Gráfica 6-20. Eficiencia de Remoción de  $\text{NO}_3^-$**

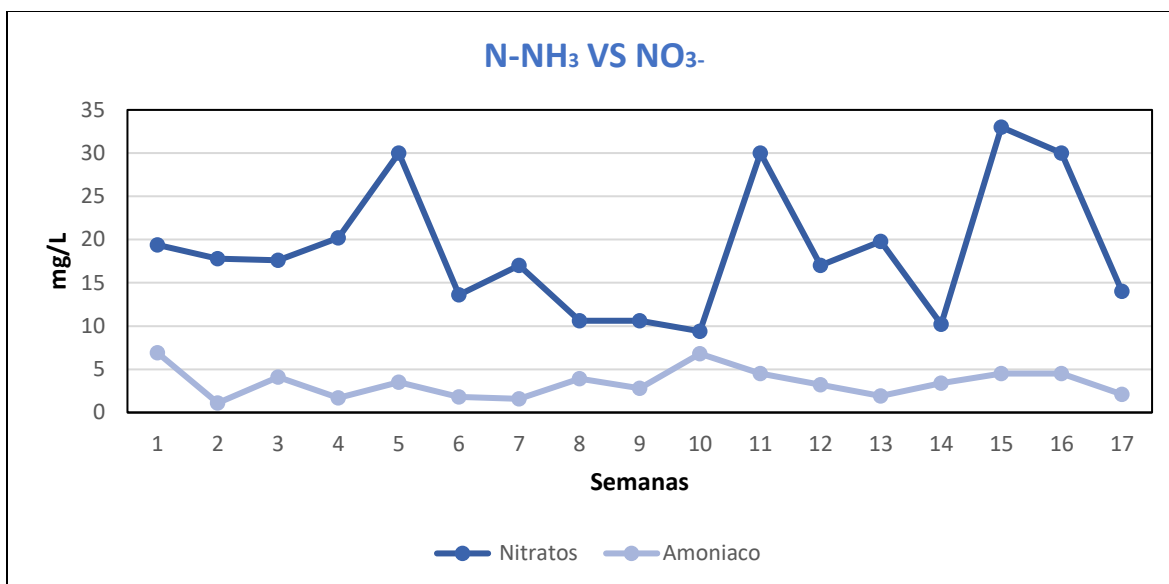
Para que el sistema opere de manera eficiente, tiene que existir una remoción por lo menos del 80%. El proceso tuvo una eficiencia de desnitrificación promedio del 94.10%., las eficiencias de remoción de  $\text{NO}_3^-$  oscilaron entre el 80% y 99 % (Gráfica 6-20). En base con esto se dice que el proceso cumplió con la eficiencia establecida.



**Gráfica 6-21. Límite para  $\text{NO}_3^-$**

Se estableció para un proceso de lodos activados que la concentración de nitratos no debe exceder los 5 mg/L en el influente (Moeller, y otros, 2011). En la Gráfica 6-21 se observa que estos siempre se mantuvieron por debajo del límite por lo que el proceso realizó una correcta desnitrificación.





**Gráfica 6-22. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Y N-NH<sub>3</sub> en el influente**

Debido a que el agua residual tiene un largo recorrido antes de llegar a la planta, esto hace que llegue nitrificada por consecuencia con bajos niveles de nitrógeno amoniacal, como se observa en la Gráfica 6-22. Mientras más alta era la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> más baja sería la concentración de N-NH<sub>3</sub>. Esto se demuestra semana diez en donde se obtuvo la mayor concentración de N-NH<sub>3</sub> y la menor concentración para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

### 6.2.6 Remoción de Solidos Suspendidos Totales (SST)

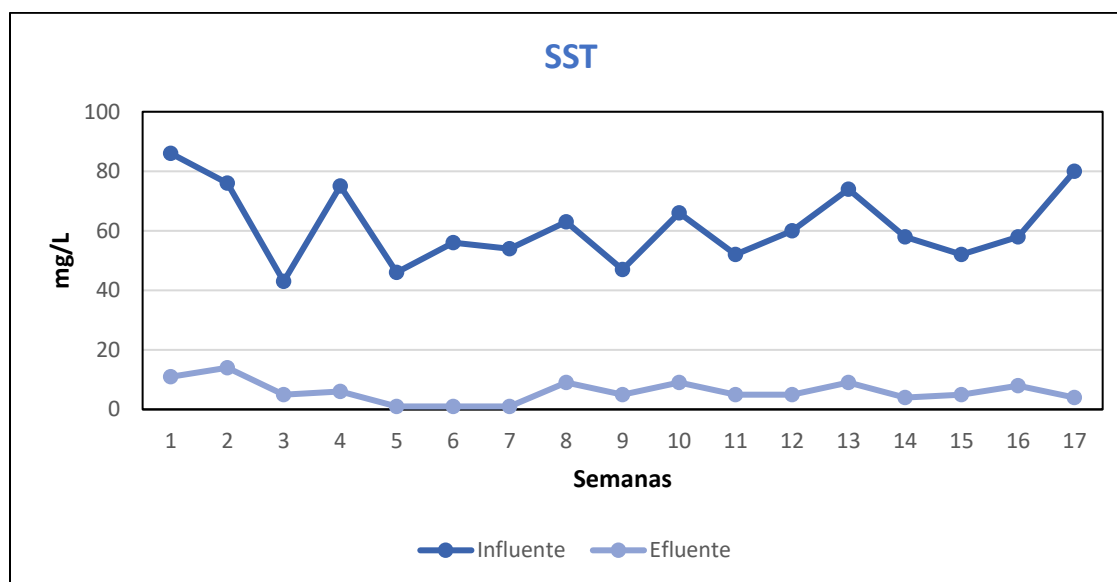
En la Tabla 6.7 se muestran los resultados de los análisis semanales de SST en el influente y efluente, así como su respectiva eficiencia de remoción.

**Tabla 6.7. Resultados de análisis de SST**

Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia Remoción %
17/8/2022	86	11	87.21
24/8/2022	76	14	81.58
31/8/2022	43	5	88.37
7/9/2022	75	6	92.00
14/9/2022	46	1	97.83
21/9/2022	56	1	98.21
28/9/2022	54	1	98.15
5/10/2022	63	9	85.71
12/10/2022	47	5	89.36
19/10/2022	66	9	86.36
27/10/2022	52	5	90.38

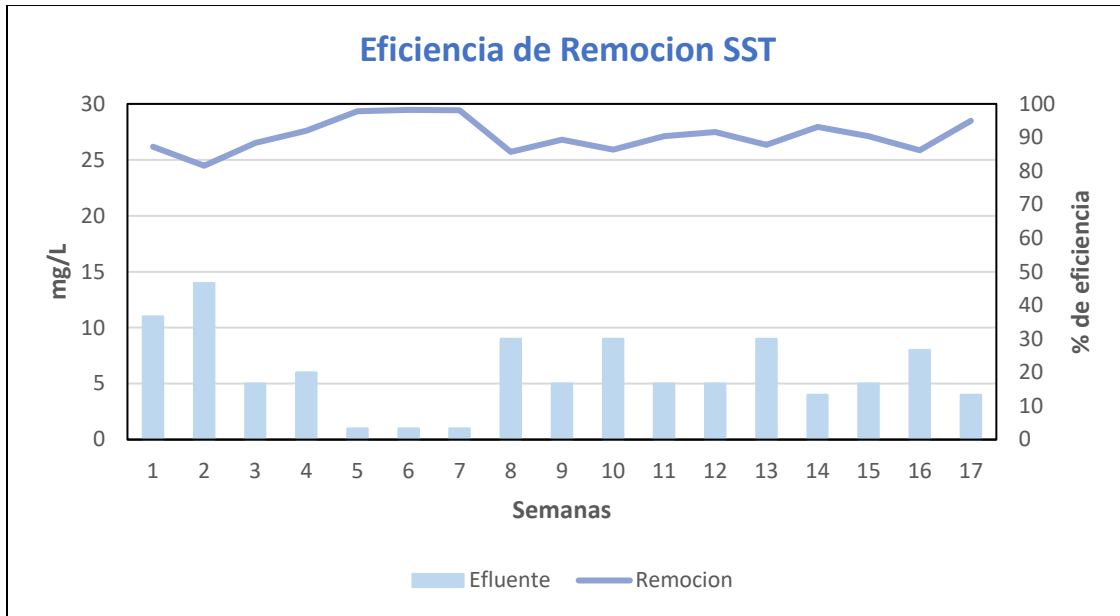
Fecha	Entrada(mg/L)	Salida(mg/L)	Eficiencia Remoción %
3/11/2022	60	5	91.67
9/11/2022	74	9	87.84
16/11/2022	58	4	93.10
23/11/2022	52	5	90.38
30/11/2022	58	8	86.21
7/12/2022	80	4	95.00
<b>Promedios</b>	<b>61.53</b>	<b>6.00</b>	<b>90.55</b>

El influente tuvo un promedio de SST del  $61.53 \pm 12.74$  mg/L con una concentración máximo de 86 mg/L y una mínima de 43 mg/L. En la primera semana se obtuvo el valor más alto de SST con 86 mg/L, a partir de esta se observaron tres picos en las semanas cuatro, trece y diecisiete con concentraciones de 75, 74 y 80 mg/L respectivamente, para el resto de las semanas los valores oscilaron alrededor de 40 mg/L y 60 mg/L (Gráfica 6-23).



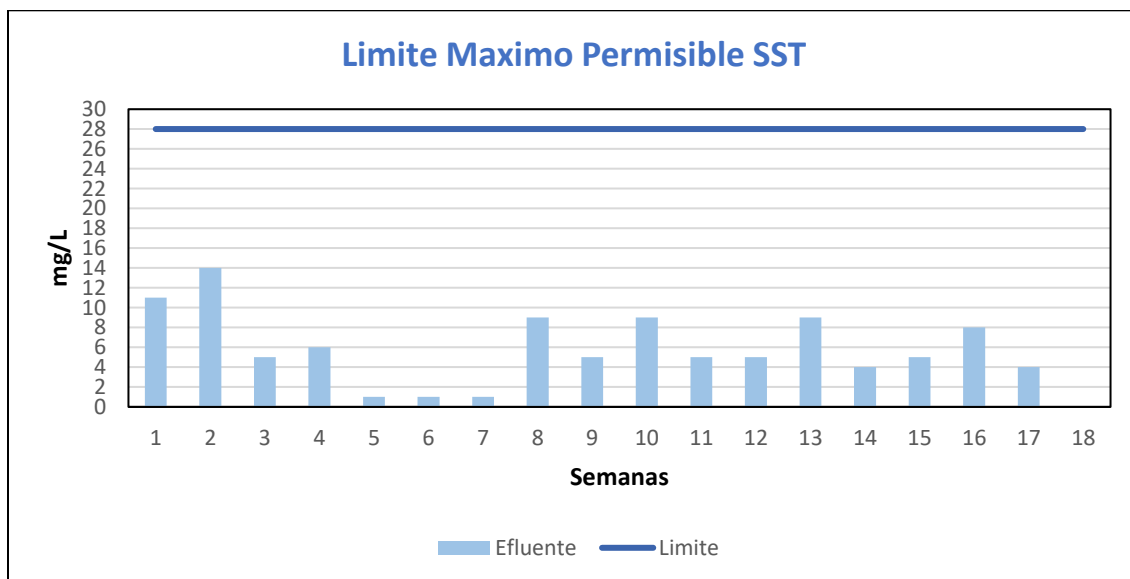
**Gráfica 6-23. Tendencia del influente y efluente para SST**

Los SST del efluente obtuvieron un promedio de  $6 \pm 3.60$  mg/L, con una máxima concentración de 14 mg/L y una mínima de 1 mg/L. En la Gráfica 6-23 se observa que en las semanas uno y dos se obtuvieron los valores más altos de SST con concentraciones de 11 y 14 mg/L, esto por la estabilización del sistema, para el resto de las semanas los valores se mantuvieron menores o igual a 9 mg/L.



**Gráfica 6-24. Eficiencia de remoción SST**

Para que el sistema opere de manera eficiente, tiene que existir una remoción del 80% (Moeller, y otros, 2011). En este caso el proceso obtuvo una eficiencia de remoción de SST promedio de 90.55%, una máxima de 98.21% y una mínima de 81.58%, aun en la mínima eficiencia cumple con lo establecido. Esto se observa en la Gráfica 6-24.



**Gráfica 6-25. Límite máximo permisible SST**

La NOM-001-SEMARNAT 2021 señala que el límite máximo permisible para SST en descargas a embalses, lagos y lagunas es de 28 mg/L, el proceso cumplió con este

parámetro de manera satisfactoria con una concentración máxima de 14 mg/L esto se demuestra en la Gráfica 6-25.

## 7 CONCLUSIONES

La concentración de oxígeno disuelto recomendada en fase anóxica es 0.20 mg/L, la obtenida en el sistema fue 0.27 mg/L, para la aerobia la concentración recomendada es 2 mg/L, en este caso se obtuvo 1.78 mg/L.

El pH promedio obtenido del agua residual fue 6.32 unidades.

El pH en la fase anóxica en promedio fue 7.12 unidades, con un valor mínimo de 6.35 y un máximo de 7.67 unidades. Al comparar estos resultados con el pH del agua residual de entrada, se nota un incremento, éste se debe a los iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) que son generados por el proceso de desnitrificación.

En la fase aerobia el pH promedio fue 6.94 unidades, con un mínimo de 6.34 y un máximo de 7.46 unidades, comparando este valor con el pH de la fase anóxica, se observa una disminución del pH, esto se debe a la generación de protones ( $\text{H}^+$ ) consecuencia de la nitrificación.

La temperatura se mantuvo en el intervalo óptimo para la actividad microbiana de 25 a 32 °C, con un promedio de 25.21 °C fase anóxica y 25.19 °C aerobia, a excepción de las últimas semanas en donde la disminución de la temperatura, por época de invierno, afectó la actividad microbiana, al llegar a 22 °C, afectando así la eficiencia de remoción para la demanda química de oxígeno y del fósforo total.

A pesar de que el índice volumétrico de lodos presentó constantes variaciones por problemas en el sistema de recirculación de lodos, éste se mantuvo dentro del rango recomendado de 35 a 150 mL/g. Con un promedio de 119.92 mL/g en la fase anóxica y 126.76 mL/g en la aerobia.

La eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) fue 81.24%, valor que se respalda con una concentración en el efluente menor a 1 mg/L, lo que su vez demuestra que el proceso de nitrificación se llevó a cabo adecuadamente.

El proceso de desnitrificación se realizó adecuadamente, al obtener una remoción del 94.10% de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y del 73.64% nitrógeno total (NT)

El producto PB8055 demostró ser una buena fuente de carbono para los microorganismos, al realizar éstos eficientemente los procesos de nitrificación y desnitrificación.

El resultado de eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) fue 85.37%, lo indica que los microorganismos se adaptaron al producto PB8055, como una fuente de carbono para realizar sus actividades metabólicas.

El producto PB8055 probó ser un suplemento de carbono de fácil asimilación, en el proceso de lodos activados, debido a que los diferentes tipos de microorganismos lograron obtener el alimento necesario para sus funciones vitales, y llevar a cabo los procesos de nitrificación y desnitrificación, proporcionando así un agua tratada que cumple con la NOM-001-SEMARNAT-2021.

## 8 REFERENCIAS

- Arnaiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Sevilla: Grupo de Tratamiento de Aguas Residuales. Escuela Universitaria Politécnica.
- Barajas, M. G. (2002). *Eliminación Biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial*. España: universidad politecnica de cataluña.
- Bluegold. (31 de marzo de 2020). *bluegold*. Obtenido de Biorreactor de membrana MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de aguas residuales: <https://www.bluegold.es/es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/>
- Cartro J. (2003). *Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales*. Barcelona: fundación universitaria Iberoamericana.
- Colombia, U. d. (2011). *Ecoligía microbiana estructural y funcional de bacterias desnitrificantes utilizando diferentes compuestos orgánicos*. Colombia: Lu Colombia.
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento, Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico: CONAGUA.
- CONAGUA. (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico: CONAGUA.
- ECODENA. (2023). *Depuradora Biológicas de oxidación total*. Obtenido de REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL SBR: <https://ecodena.com/oxidacion-total-sistema-sbr/>
- EPA. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales zanjas de oxidación*. U.S: Municipal Technology Branch .

estrucplan. (4 de noviembre de 2008). *estrucplan*. Obtenido de Ingeniería De Tratamiento De Aguas Residuales: Procesos Biológicos Aerobios: <https://estrucplan.com.ar/ingenieria-de-tratamiento-de-aguas-residuales-procesos-biologicos-aerobios/>

Fresenius, W., & Scheider, W. (1991). *Manual de disposicion de aguas residuales*. Peru: Institut Fresenius GmbH.

Knowles R. (1982). *Desnitrificacion Microbiol.*

Martinez, R. (2022). *Efecto de un campo magentico en un proceso de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico: Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua.

Metcalf&Eddy. (2003). *Ingenieria de aguas residuales: Tratamiento y reutilizacion*. Mexico: Mc Graw Hill.

Metcalf, & Eddy. (2014). *WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT AND RESOURCE RECOVERY* (fifth edition ed.). New york: Mc Graw Hill Education.

Moeller Chavez, G., Sandoval Yoal, L., Ramirez Gonzalez, A., Ramirez Camperos, E., Cardoso Vigueros, L., Escalante Estrada, V., . . . Ortiz Rendon, G. (2011). *Tratamiento de aguas residuales*. Mexico: Instituto mexicano de tecnologia del agua.

Moletta R. (1993). *La digestion anaerobica: de la mas pequeña a la mas grande*. Biofuturo.

NMX-AA-029-SCFI. (2001). *Analisis de aguas*. Mexico: Determinacion de fosforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-034-SCFI. (-2015). *NMX-AA-034-SCFI. MEDICION DE SOLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUA NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-METODO DE PRUEBA*. MEXICO: Secretaria de Economia.



- Noguera, B. (22 de OCTUBRE de 2020). *IQR INGENIERIA QUIMICA*. Obtenido de Reactores de mezcla completa CSTR: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/reactores-de-mezcla-completa-cstr.html#Definicion-de-reactor-de-mezcla-completa-CSTR>
- Nuñez, J. (07 de septiembre de 2014). *SCRIBD*. Obtenido de ESTABILIZACION POR CONTACTO: <https://es.scribd.com/doc/238966728/Estabilizacion-Por-Contacto>
- Ontiveros, G. A., Alberto, L., & Campanella, E. A. (2010). *Evaluacion del comportamiento de PPCPs en dos procesos Ludzack-Ettinger y Ludzack-Ettinger modificado*. argentina: ingeniería sanitaria y ambiental.
- Passen, M. (26 de octubre de 2021). *Micro Biio*. Obtenido de <https://microbiio.info/nitrificacion-vs-desnitrificacion/>
- Ramalho, R. S. (2004). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. BARCELONA: REVERTE S.A.
- Reyna, M. A. (2022). *Efecto de un campo magnetico en un proceso de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales municipales*. Mexico: Instituto Mexicano de Tegnologia del Agua.
- Rojas, R. (2002). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Gestion integral de tratamiento de aguas residuales* (volumen 2 ed.).
- Romero R. Jairo A. (2008). *Tratamiento de agua residual. Teoria y principios de diseño* (tercera ediccion ed.). Colombia: escuela colombiana de ingenieria.
- Romero R.J. (2005). *Tratamiento de aguas residuales. Teoria y principios de diseño* (3a ed.).
- Romero Rojas, J. (2005). *Tratamiento de aguas residuales. Teoria y principios de diseño*. Colombia: Escuela Colombiaba de Ingenieria.
- Scheible, O. M. (1993). *MANUAL DE DISEÑO DE PROCESOS: CONTROL DE NITRÓGENO*. Obtenido de EPA:

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004MI0.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995%20Thru%201999%7C1991%20Thru%201994%7C1986%20Thru%201990%7CHardcopy%20Publications&Docs=&Query=EPA%2F625%2FR-93%2F010&Time=&EndTime=&SearchMethod=2&TocRestrict=n&To>

SEMARNAT. (1997). *Norma oficial mexicana NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México . Mexico.*

Singler, A. &. (2017). *Alcalinidad, pH y solidos disueltos totales.* . Obtenido de Obtenido de Well Educated Educacion en el Agua de Pozo: [http://region8water.colostate.edu/PDFs/we\\_espanol/Alkalinity\\_pH\\_TDS](http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS)

Valencia, L. F., & Marulanda, I. C. (2003). *SCRIBD*. Obtenido de Estabilización Por Contacto | PDF | Aguas residuales | Residuos (scribd.com): Estabilización Por Contacto | PDF | Aguas residuales | Residuos (scribd.com)

Vanero, M., & Salinas, L. (2011). *Manual de biogas*. Chile: proyecto CHI/00/G32.

Velp, S. (28 de 09 de 2022). *NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL (TKN) Y NITRÓGENO TOTAL (TN): DIFERENCIAS Y EQUIPOS DE ANÁLISIS*. Obtenido de Velp Scientifica (V.S.) Srl: [https://www.velp.com/es-sa/nitrogeno-total-kjeldahl-tn-y-nitrogeno-total-tn-diferencias-y-equipos-de-analisis.aspx#:~:text=Total%20Nitrogen%20\(TN\)&text=El%20nitr%C3%B3geno%20total%2C%20por%20su,de%20nitr%C3%B3geno%20inorg%C3%A1nico%20es%20significativa](https://www.velp.com/es-sa/nitrogeno-total-kjeldahl-tn-y-nitrogeno-total-tn-diferencias-y-equipos-de-analisis.aspx#:~:text=Total%20Nitrogen%20(TN)&text=El%20nitr%C3%B3geno%20total%2C%20por%20su,de%20nitr%C3%B3geno%20inorg%C3%A1nico%20es%20significativa).

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo 1 Hoja técnica del producto PB8055 por la empresa ChemTreat



## Biological Supplement Nutrient Blend **PB8055**

---

### GENERAL DESCRIPTION

**PB8055** is a glycerin based biological supplement designed to provide an efficient carbon source for a variety of wastewater treatments, ranging from denitrification to BOD augmentation.

**PB8055** is a non-hazardous viable alternative to traditional methanol-based chemistries.

### FEATURES

- Non- hazardous
- Easy to feed

### BENEFITS

- Environmentally friendly
- Derived from renewable resources

### TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

Form:	Liquid
Color:	Dark Straw – Brown
Clarity:	Clear – Cloudy
Odor:	Mild
pH* :	5.0 – 7.5 (100.0%)
Specific Gravity*:	1.230 – 1.280
Density (lb/gal)*:	Range

*\*Typical properties at 20°C unless otherwise noted.*

Refer to **PB8055** SDS for specifics regarding safety and handling.

### **FEEDING, DOSAGE, AND CONTROL**

Please consult your ChemTreat representative for proper feeding equipment selection and compatibility. Dosage and Control parameters should be established by a ChemTreat representative for the specific application and water chemistry conditions.

### **MATERIALS OF COMPATIBILITY**

Compatibilities with materials of construction are available upon request from a ChemTreat representative.

### **SHIPPING AND HANDLING**

This product should be shipped and stored between 40-100 F. Containers must remain closed and not exposed to humidity, direct sunlight, contact heaters, etc.

## 9.2 Anexo 2 Límites permisibles NOM-001-SEMARNAT-2021

### Límites Permisibles

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cártilo		
										P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6 - 9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	435 nm									7,0 m <sup>-1</sup>								
	525 nm									5,0 m <sup>-1</sup>								
	620 nm									3,0 m <sup>-1</sup>								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
<p>N.A: No Aplica  P.M: Promedio Mensual  P.D: Promedio Diario  V.I: Valor Instantáneo  NMP: Número más probable  UpH: Unidades de pH  UT: Unidades de Toxicidad</p> <p>* Si Cloruro es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO.  * Si Cloruro es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT.  * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli.  * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.</p> <p>Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.</p>																		

### 9.3 Anexo 3 Tablas de datos de parámetros de control

OD (mg/L)				
Fecha	Entrada	Reactor Anóxico	Reactor Aerobio	Salida
15/8/2022	0.87	0.22	1.41	3.53
16/8/2022	0.46	0.27	1.33	5.16
17/8/2022	0.32	0.21	1.46	5.2
18/8/2022	0.42	0.33	1.48	5.21
22/8/2022	0.47	0.36	1.72	5.85
23/8/2022	0.38	0.24	1.24	5.21
24/8/2022	0.32	0.27	2	5.16
25/8/2022	0.5	0.21	1.61	5.92
26/8/2022	0.26	0.31	1.41	5.48
29/8/2022	0.3	0.29	1.82	4.55
30/8/2022	0.27	0.2	1.35	3.07
31/8/2022	0.35	0.26	1.24	3.15
1/9/2022	0.28	0.31	1.46	5.58
2/9/2022	0.49	0.2	1.62	5.47
5/9/2022	0.17	0.16	1.5	2.03
6/9/2022	0.22	0.34	1.39	6.08
7/9/2022	0.32	0.29	1.38	6.18
8/9/2022	0.21	0.24	1.44	4.38
9/9/2022	0.98	0.32	2.23	5.05
12/9/2022	0.23	0.32	1.45	4.05
13/9/2022	1.8	0.26	1.23	2.44
14/9/2022	0.34	0.23	2.33	5.71
15/9/2022	0.22	0.26	1.98	5.37
19/9/2022	0.25	0.25	1.64	4.17
20/9/2022	0.26	0.27	2.32	4.59
21/9/2022	0.24	0.26	1.51	4.04
22/9/2022	0.35	0.25	2.33	5.68
23/9/2022	0.25	0.22	1.98	6.49
26/9/2022	0.31	0.28	1.25	5.25
27/9/2022	0.45	0.2	2.07	5.7
28/9/2022	0.36	0.33	1.57	6.25
29/9/2022	0.24	0.19	2.3	5.45
30/9/2022	0.38	0.35	2.2	2.8
3/10/2022	0.49	0.16	1.22	1.93
4/10/2022	0.7	0.22	2.1	2.84
5/10/2022	0.34	0.26	1.49	2.73
6/10/2022	0.32	0.28	2.1	3
7/10/2022	0.75	0.15	1.5	1.29
10/10/2022	0.9	0.27	1.47	2.02
11/10/2022	1.15	0.3	1.52	2.86
12/10/2022	0.37	0.33	1.71	3.02
13/10/2022	0.54	0.25	2.3	2.11

OD (mg/L)				
Fecha	Entrada	Reactor Anóxico	Reactor Aerobio	Salida
14/10/2022	0.46	0.31	1.97	2.75
17/10/2022	0.73	0.28	1.9	2.7
18/10/2022	0.52	0.34	1.62	2.84
19/10/2022	0.51	0.2	2.33	2.99
20/10/2022	1.11	0.12	1.36	2.54
21/10/2022	0.36	0.36	1.82	3.02
24/10/2022	0.95	0.22	2.5	3.96
25/10/2022	0.32	0.33	1.85	2.22
27/10/2022	0.52	0.23	1.24	3.82
28/10/2022	1.2	0.28	1.87	3.62
31/10/2022	0.83	0.21	1.78	3.9
1/11/2022	0.62	0.16	1.47	3.64
3/11/2022	0.51	0.27	1.64	3.91
4/11/2022	0.69	0.33	1.31	3.66
7/11/2022	0.24	0.26	2.1	3.8
8/11/2022	0.29	0.31	1.52	3.11
9/11/2022	0.34	0.32	1.75	3.81
10/11/2022	0.35	0.35	1.86	3.54
11/11/2022	0.34	0.32	1.14	4.36
14/11/2022	0.34	0.27	1.7	2.94
15/11/2022	0.3	0.25	2.21	3.11
16/11/2022	0.33	0.34	2.11	3.83
17/11/2022	0.31	0.24	2.33	3.76
18/11/2022	0.44	0.23	2.26	3.98
22/11/2022	0.33	0.24	1.47	4.43
23/11/2022	0.29	0.35	2.05	3.63
24/11/2022	0.37	0.24	1.96	3.29
25/11/2022	0.3	0.33	1.55	2.91
28/11/2022	0.41	0.27	1.64	2.01
29/11/2022	0.39	0.28	1.75	2.42
30/11/2022	0.34	0.27	2.07	2.33
1/12/2022	0.46	0.3	2.28	4.06
5/11/2022	0.55	0.33	2.27	3.99
6/11/2022	0.51	0.26	2.31	3.2
7/11/2022	0.43	0.29	2.37	3.87
8/11/2022	0.56	0.32	2.75	3.64
9/11/2022	0.29	0.33	2.22	2.91
Promedios	0.4642	0.2691	1.7847	3.8804

<b>Temperatura (°C)</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Entrada</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>	<b>Salida</b>
<b>15/8/2022</b>	24.2	25.4	25.4	24.3
<b>16/8/2022</b>	24.2	25.1	25.1	24.1
<b>17/8/2022</b>	24.7	25.6	25.3	24.2
<b>18/8/2022</b>	25.2	25.9	25.5	24.6
<b>22/8/2022</b>	23.2	25.1	25.2	24.3
<b>23/8/2022</b>	25	25.8	25.7	24.7
<b>24/8/2022</b>	26.5	26	26	25.5
<b>25/8/2022</b>	25.5	25.8	25.7	24.9
<b>26/8/2022</b>	27.1	26.3	26.3	26
<b>29/8/2022</b>	25	25.9	25.8	24.2
<b>30/8/2022</b>	25.7	25.3	25.5	24.9
<b>31/8/2022</b>	26	25.5	25.5	25.5
<b>1/9/2022</b>	26.1	25.6	25.6	25.1
<b>2/9/2022</b>	26.6	26	25.8	24.9
<b>5/9/2022</b>	25.5	25.4	25.4	25
<b>6/9/2022</b>	24.7	25.1	25	23
<b>7/9/2022</b>	25.7	25	25	24.4
<b>8/9/2022</b>	25.1	24.9	25	24.5
<b>9/9/2022</b>	23.6	25.9	25.9	23.7
<b>12/9/2022</b>	26	26	25.5	25.5
<b>13/9/2022</b>	24.1	25.3	25.4	25
<b>14/9/2022</b>	25.5	25	25.9	24.4
<b>15/9/2022</b>	25.8	25	25.4	24
<b>19/9/2022</b>	24.8	25.4	25.1	24
<b>20/9/2022</b>	25	25.4	25.3	24.2
<b>21/9/2022</b>	25.7	25.2	25	24.6
<b>22/9/2022</b>	25.9	25.1	25.9	24.6
<b>23/9/2022</b>	26.1	25.2	25.9	24
<b>26/9/2022</b>	25.6	25.9	25.7	24.7
<b>27/9/2022</b>	25.4	25.7	26.6	24.2
<b>28/9/2022</b>	25.2	25.7	25.5	24
<b>29/9/2022</b>	25.1	25.5	25.4	24.1
<b>30/9/2022</b>	25.03	25.01	25.8	23.4
<b>3/10/2022</b>	26	25.2	24.9	24.1
<b>4/10/2022</b>	25.4	25.6	25.4	23.7
<b>5/10/2022</b>	25.3	25.4	25.2	23.8
<b>6/10/2022</b>	25.6	25.9	25.7	24.3
<b>7/10/2022</b>	25.11	25.3	25.2	23.8
<b>10/10/2022</b>	25.7	25.8	25.4	25



<b>11/10/2022</b>	25.8	24.9	25.8	24.7
<b>12/10/2022</b>	26.1	25	24.9	24.9
<b>13/10/2022</b>	26.4	25.5	25.4	25.9
<b>14/10/2022</b>	25.5	25.9	25.7	23.5
<b>17/10/2022</b>	27	26.1	25.9	26
<b>18/10/2022</b>	25.9	25.1	25.03	24.9
<b>19/10/2022</b>	24.5	25.07	25.9	23.9
<b>20/10/2022</b>	24.4	25.1	25.9	22.9
<b>21/10/2022</b>	22.9	25.9	25.7	22.7
<b>24/10/2022</b>	25.8	25.3	25.1	25.1
<b>25/10/2022</b>	26.1	25.8	25.7	25.7
<b>27/10/2022</b>	26.2	25.7	25.3	25.2
<b>28/10/2022</b>	25.9	25.5	25.3	25.5
<b>31/10/2022</b>	26.1	25.5	25.2	25.01
<b>1/11/2022</b>	24.7	25.6	25.5	25.2
<b>3/11/2022</b>	25.01	25.7	25.4	24.6
<b>4/11/2022</b>	25.2	25.7	25.5	24.6
<b>7/11/2022</b>	25.5	25.8	25.7	24.7
<b>8/11/2022</b>	25.1	25.5	25.3	24.5
<b>9/11/2022</b>	25.2	25.5	25.4	24.3
<b>10/11/2022</b>	23.9	25.9	25.9	23.9
<b>11/11/2022</b>	24.9	25.3	25.8	23.9
<b>14/11/2022</b>	25.1	25.9	25.8	24.5
<b>15/11/2022</b>	25.2	25.7	25.6	24.7
<b>16/11/2022</b>	25.1	25.5	25.3	25.1
<b>17/11/2022</b>	25.6	25.7	25.6	23.6
<b>18/11/2022</b>	25.8	25.3	25.1	24.9
<b>22/11/2022</b>	24	24.7	24.6	23.8
<b>23/11/2022</b>	24.9	24.2	24.3	24.1
<b>24/11/2022</b>	25	24.3	24.2	24.1
<b>25/11/2022</b>	24.9	24.4	24.2	24.2
<b>28/11/2022</b>	23.9	24.1	24.1	24.2
<b>29/11/2022</b>	24.7	24.3	24.2	24.2
<b>30/11/2022</b>	24.8	24.5	24.3	24.3
<b>1/12/2022</b>	23.3	23.1	23	23.1
<b>5/12/2022</b>	21.6	22.4	22.3	22.5
<b>6/12/2022</b>	23.1	23	22.8	22.7
<b>7/12/2022</b>	23.2	23.2	23	22.8
<b>8/12/2022</b>	22.3	22	21.9	21.8
<b>9/12/2022</b>	24.9	23.4	23.2	24.2
<b>Promedios</b>	25.11	25.21	25.19	24.35

<b>pH</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Entrada</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>	<b>Salida</b>
15/08/2022	6.46	6.86	6.82	7.03
16/08/2022	6.15	6.86	6.65	6.71
17/08/2022	5.91	6.92	6.71	6.8
18/08/2022	6.08	7	6.87	6.94
22/08/2022	6.58	7.07	6.92	6.63
23/08/2022	6.4	6.53	6.53	6.59
24/08/2022	5.78	6.57	6.46	6.52
25/08/2022	5.88	6.75	6.71	6.9
26/08/2022	6.04	6.81	6.74	7
29/08/2022	6.56	6.77	6.81	6.78
30/08/2022	6.24	6.75	6.75	6.82
31/08/2022	6.01	6.74	6.72	6.87
01/09/2022	5.99	6.72	6.68	6.67
02/09/2022	6.34	6.91	6.91	7
05/09/2022	6.74	6.96	6.96	6.95
06/09/2022	6.31	6.79	6.82	7.01
07/09/2022	6.2	6.94	6.67	6.67
08/09/2022	6.3	6.86	6.7	6.91
09/09/2022	6.04	7.09	6.84	6.89
12/09/2022	6.44	6.83	6.76	6.96
13/09/2022	6.14	7	6.8	6.92
14/09/2022	5.96	7.08	6.69	6.71
15/09/2022	6.09	7.11	6.51	7.03
19/09/2022	6.47	6.89	6.48	6.95
20/09/2022	6.25	6.84	6.76	6.8
21/09/2022	5.9	7.04	7.04	7.1
22/09/2022	6.19	6.81	6.75	6.76
23/09/2022	6	6.94	6.58	7.06
26/09/2022	6.36	6.87	6.68	7.02
27/09/2022	5.73	6.8	6.61	7.16
28/09/2022	5.8	6.98	6.91	7.16
29/09/2022	6.1	6.8	6.45	6.89
30/09/2022	6.33	7.35	7.19	7.4
03/10/2022	6.88	7.28	7.25	7.19
04/10/2022	6.32	7.31	7.25	7.47
05/10/2022	6.14	7.48	7.13	7.33
06/10/2022	6.2	7.33	7.07	7.3
07/10/2022	6.36	7.19	7.14	7.26
10/10/2022	6.8	7.25	7.15	7.42
11/10/2022	6.33	7.39	7.22	7.63
12/10/2022	6.2	6.91	7.27	7.7
13/10/2022	6.29	7.28	7.24	7.4
14/10/2022	6.3	7.43	7.19	7.4
17/10/2022	6.81	7.43	7.39	7.7

<b>pH</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Entrada</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>	<b>Salida</b>
18/10/2022	6.29	7.51	7.31	7.37
19/10/2022	6.28	7.45	7.17	7.19
20/10/2022	6.33	7.4	7.46	7.47
21/10/2022	6.19	7.53	7.12	7.19
24/10/2022	6.86	7.51	7.14	7.18
25/10/2022	6.28	7.52	7.21	7.55
27/10/2022	6.33	7.64	6.72	7.32
28/10/2022	6.46	7.67	7.21	7.6
31/10/2022	7.03	7.46	7.33	7.41
01/11/2022	6.24	7.59	7.07	7.54
03/11/2022	6.46	7.24	6.71	7.59
04/11/2022	6.52	7.56	7.26	7.23
07/11/2022	7.13	7.32	7.22	7.22
08/11/2022	5.81	7.02	6.7	6.92
09/11/2022	6.15	7.31	7.08	7.09
10/11/2022	6.19	7.35	7.05	7.35
11/11/2022	6.29	6.35	6.34	6.74
14/11/2022	7.14	7.22	6.82	6.85
15/11/2022	6.44	7.1	7.07	7.22
16/11/2022	6.5	7.3	7.14	7.12
17/11/2022	6.49	7.45	7.14	7.16
18/11/2022	6.39	6.92	6.93	7.08
22/11/2022	7.02	7.39	7.3	7.32
23/11/2022	6.4	7.33	7.29	7.37
24/11/2022	6.24	7.38	7.21	7.19
25/11/2022	6.15	6.68	6.66	6.7
28/11/2022	6.32	7.3	7.01	7.06
29/11/2022	6.16	7.3	7.12	7.4
30/11/2022	6.26	7.36	7.09	7.16
01/12/2022	6.72	7.12	7.01	7.1
05/11/2022	7.21	7.38	7.22	7.23
06/11/2022	6.49	7.42	7.08	7.1
07/11/2022	6.18	7.13	6.84	6.86
08/11/2022	6.28	7.42	7.14	7.19
09/11/2022	6.15	6.68	6.66	6.72
<b>Promedios</b>	6.326329114	7.12	6.94	7.10

<b>SST (mg/L)</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Entrada</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>	<b>Salida</b>
<b>15/8/2022</b>	93	2566	1573	47
<b>16/8/2022</b>	40	3471	3080	33
<b>17/8/2022</b>	34.6	2710	2746	17.6
<b>18/8/2022</b>	27.3	2200	1866	8.6
<b>22/8/2022</b>	36.3	1985	1870	32
<b>23/8/2022</b>	35.5	2306	2813	18
<b>24/8/2022</b>	39	3025	2758	14.6
<b>25/8/2022</b>	23.6	1693	1878	5.3
<b>26/8/2022</b>	42	1726	1656	3.6
<b>29/8/2022</b>	26.6	2356	1868	12
<b>30/8/2022</b>	37.6	1830	1681	4
<b>31/8/2022</b>	30.3	2171	2293	5
<b>1/9/2022</b>	37.6	1645	1985	8
<b>2/9/2022</b>	31	1599	1758	7
<b>5/9/2022</b>	20	2326	2413	29
<b>6/9/2022</b>	31.6	1858	1610	2
<b>7/9/2022</b>	55.6	1351	1775	11
<b>8/9/2022</b>	64.6	1895	1760	65
<b>9/9/2022</b>	75.6	1771	1587	22.6
<b>12/9/2022</b>	39	2096	1870	29
<b>13/9/2022</b>	39	1716	1995	5
<b>14/9/2022</b>	77	1938	1313	0
<b>15/9/2022</b>	44	1903	1653	3
<b>19/9/2022</b>	51	2430	1745	27
<b>20/9/2022</b>	45	1570	1680	6
<b>21/9/2022</b>	44.3	1701	1766	2
<b>22/9/2022</b>	52	1583	1703	7
<b>23/9/2022</b>	56	1876	1828	10.6
<b>26/9/2022</b>	47	1783	1660	5
<b>27/9/2022</b>	44	1980	1455	4
<b>28/9/2022</b>	45	1590	1746	4
<b>29/9/2022</b>	37	1815	2235	2
<b>30/9/2022</b>	36	1710	1835	1
<b>3/10/2022</b>	38	1761	1845	16
<b>4/10/2022</b>	36	1890	1908	4
<b>5/10/2022</b>	48	1736	1886	2
<b>6/10/2022</b>	47.6	1771	1656	6
<b>7/10/2022</b>	33	1660	1753	4
<b>10/10/2022</b>	75.3	1493	1597	13
<b>11/10/2022</b>	66.3	1736	1750	5.6
<b>12/10/2022</b>	44.3	1563	1651	12

<b>SST (mg/L)</b>				
<b>Fecha</b>	<b>Entrada</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>	<b>Salida</b>
<b>13/10/2022</b>	53.6	1568	1628	4.6
<b>14/10/2022</b>	32.6	1686	1675	9
<b>17/10/2022</b>	35.3	1745	1526	3
<b>18/10/2022</b>	39.6	1708	1580	0.3
<b>19/10/2022</b>	34.6	1898	1640	2.6
<b>20/10/2022</b>	33.3	1551	1940	5.6
<b>21/10/2022</b>	64	1823	1752	8
<b>24/10/2022</b>	62	2381	1380	3.6
<b>25/10/2022</b>	49	1853	1716	1.6
<b>27/10/2022</b>	43	1915	2121	2.6
<b>28/10/2022</b>	65	1895	1718	4
<b>31/10/2022</b>	43	1935	1881	7
<b>1/11/2022</b>	123	1790	1708	1
<b>3/11/2022</b>	55	2089	2101	12
<b>4/11/2022</b>	28	1823	1759	1.3
<b>7/11/2022</b>	39	1684	1378	1
<b>8/11/2022</b>	44.33	1453	1996	1
<b>9/11/2022</b>	54	1593	1755	9
<b>10/11/2022</b>	33	1748	1926	5
<b>11/11/2022</b>	38	1818	1775	7
<b>14/11/2022</b>	70	1901	1680	9
<b>15/11/2022</b>	57.6	1710	1435	2.6
<b>16/11/2022</b>	59.6	1611	1475	9
<b>17/11/2022</b>	43.67	1776	1354	0.33
<b>18/11/2022</b>	55.3	1708	1810	8
<b>22/11/2022</b>	47	2490	1866	5
<b>23/11/2022</b>	46	1571	1630	8
<b>24/11/2022</b>	56	1463	1568	7
<b>25/11/2022</b>	54.6	1875	1975	2
<b>28/11/2022</b>	78	1529	1892	8.6
<b>29/11/2022</b>	83.33	1903	1695	6.3
<b>30/11/2022</b>	86	1578	1648	1
<b>1/12/2022</b>	69	1764	1594	9
<b>5/11/2022</b>	40	1575	1478	4
<b>6/11/2022</b>	56	1670	1320	4
<b>7/11/2022</b>	71	1991	1409	8.67
<b>8/11/2022</b>	90	2030	1490	4
<b>9/11/2022</b>	54.6	1571	1630	2
<b>Promedio</b>	49.54	1866.54	1789.92	8.87

<b>IVL</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>
<b>15/8/2022</b>	101.33	178.00
<b>16/8/2022</b>	86.43	94.16
<b>17/8/2022</b>	77.49	76.47
<b>18/8/2022</b>	113.64	112.54
<b>22/8/2022</b>	105.79	128.34
<b>23/8/2022</b>	104.08	99.54
<b>24/8/2022</b>	82.64	94.27
<b>25/8/2022</b>	135.85	119.81
<b>26/8/2022</b>	162.22	120.77
<b>29/8/2022</b>	131.58	139.19
<b>30/8/2022</b>	158.47	172.52
<b>31/8/2022</b>	82.91	87.22
<b>1/9/2022</b>	170.21	125.94
<b>2/9/2022</b>	143.84	96.70
<b>5/9/2022</b>	81.69	74.60
<b>6/9/2022</b>	150.70	173.91
<b>7/9/2022</b>	192.45	135.21
<b>8/9/2022</b>	110.82	107.95
<b>9/9/2022</b>	84.70	170.13
<b>12/9/2022</b>	124.05	128.34
<b>13/9/2022</b>	151.52	145.36
<b>14/9/2022</b>	103.20	137.09
<b>15/9/2022</b>	84.08	90.74
<b>19/9/2022</b>	74.07	97.42
<b>20/9/2022</b>	165.61	148.81
<b>21/9/2022</b>	94.06	113.25
<b>22/9/2022</b>	157.93	135.06
<b>23/9/2022</b>	117.27	103.94
<b>26/9/2022</b>	145.82	132.53
<b>27/9/2022</b>	85.86	130.58
<b>28/9/2022</b>	169.81	143.18
<b>29/9/2022</b>	137.74	98.43
<b>30/9/2022</b>	111.11	108.99
<b>3/10/2022</b>	136.29	146.34
<b>4/10/2022</b>	95.24	115.30
<b>5/10/2022</b>	97.93	159.07
<b>6/10/2022</b>	124.22	138.89
<b>7/10/2022</b>	150.60	125.50
<b>10/10/2022</b>	194.24	147.15
<b>11/10/2022</b>	80.65	160.00
<b>12/10/2022</b>	166.35	127.20
<b>13/10/2022</b>	108.42	110.57
<b>14/10/2022</b>	119.22	143.28

<b>IVL</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Reactor Anóxico</b>	<b>Reactor Aerobio</b>
<b>17/10/2022</b>	131.81	144.17
<b>18/10/2022</b>	128.81	158.23
<b>19/10/2022</b>	126.45	128.05
<b>20/10/2022</b>	122.50	103.09
<b>21/10/2022</b>	142.62	131.28
<b>24/10/2022</b>	92.40	159.42
<b>25/10/2022</b>	140.31	119.46
<b>27/10/2022</b>	78.33	89.58
<b>28/10/2022</b>	142.48	151.34
<b>31/10/2022</b>	108.53	132.91
<b>1/11/2022</b>	128.49	158.08
<b>3/11/2022</b>	102.92	95.19
<b>4/11/2022</b>	120.68	136.44
<b>7/11/2022</b>	136.58	159.65
<b>8/11/2022</b>	192.70	125.25
<b>9/11/2022</b>	150.66	153.85
<b>10/11/2022</b>	137.30	119.42
<b>11/11/2022</b>	77.01	146.48
<b>14/11/2022</b>	94.69	113.10
<b>15/11/2022</b>	99.42	146.34
<b>16/11/2022</b>	117.94	189.83
<b>17/11/2022</b>	101.35	187.59
<b>18/11/2022</b>	146.37	116.02
<b>22/11/2022</b>	92.37	96.46
<b>23/11/2022</b>	101.85	92.02
<b>24/11/2022</b>	136.71	159.44
<b>25/11/2022</b>	112.00	91.14
<b>28/11/2022</b>	156.97	110.99
<b>29/11/2022</b>	89.33	129.79
<b>30/11/2022</b>	133.08	121.36
<b>1/12/2022</b>	136.05	150.56
<b>5/11/2022</b>	158.73	142.08
<b>6/11/2022</b>	161.68	181.82
<b>7/11/2022</b>	90.41	113.56
<b>8/11/2022</b>	93.60	114.09
<b>9/11/2022</b>	184.60	116.56
<b>Promedio</b>	123.29	128.85

<b>SSTLM</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Reactor</b>
<b>15/8/2022</b>	2069.5
<b>16/8/2022</b>	3275.8
<b>17/8/2022</b>	2728.33
<b>18/8/2022</b>	2728.33
<b>22/8/2022</b>	1077.5
<b>23/8/2022</b>	2559.95
<b>24/8/2022</b>	2891.65
<b>25/8/2022</b>	1785.65
<b>26/8/2022</b>	1641.6
<b>29/8/2022</b>	2112.185
<b>30/8/2022</b>	1860.8
<b>31/8/2022</b>	2232.15
<b>1/9/2022</b>	1910
<b>2/9/2022</b>	1678.5
<b>5/9/2022</b>	2369.5
<b>6/9/2022</b>	1484.15
<b>7/9/2022</b>	963.3
<b>8/9/2022</b>	1827.5
<b>9/9/2022</b>	1538
<b>12/9/2022</b>	2133.3
<b>13/9/2022</b>	1005.8
<b>14/9/2022</b>	975.83
<b>15/9/2022</b>	1928.3
<b>19/9/2022</b>	1887.5
<b>20/9/2022</b>	1625
<b>21/9/2022</b>	1484.16
<b>22/9/2022</b>	1643.3
<b>23/9/2022</b>	1252.45
<b>26/9/2022</b>	1241
<b>27/9/2022</b>	1367.5
<b>28/9/2022</b>	1168
<b>29/9/2022</b>	2025
<b>30/9/2022</b>	1122.5
<b>3/10/2022</b>	1053
<b>4/10/2022</b>	1299
<b>5/10/2022</b>	1061.67
<b>6/10/2022</b>	1164.1
<b>7/10/2022</b>	1106.67
<b>10/10/2022</b>	1345.35
<b>11/10/2022</b>	1143.3
<b>12/10/2022</b>	1607.45



<b>SSTLM</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Reactor</b>
<b>13/10/2022</b>	1598.3
<b>14/10/2022</b>	1080.83
<b>17/10/2022</b>	1635.83
<b>18/10/2022</b>	1644.15
<b>19/10/2022</b>	1969
<b>20/10/2022</b>	1246.67
<b>21/10/2022</b>	1487.95
<b>24/10/2022</b>	1880.5
<b>25/10/2022</b>	884.78
<b>27/10/2022</b>	2518.3
<b>28/10/2022</b>	1506
<b>31/10/2022</b>	1408.3
<b>1/11/2022</b>	1499
<b>3/11/2022</b>	2195
<b>4/11/2022</b>	1341.43
<b>7/11/2022</b>	1532
<b>8/11/2022</b>	1324.99
<b>9/11/2022</b>	1324
<b>10/11/2022</b>	937
<b>11/11/2022</b>	1446.67
<b>14/11/2022</b>	2090
<b>15/11/2022</b>	1572.5
<b>16/11/2022</b>	1543
<b>17/11/2022</b>	1265.56
<b>18/11/2022</b>	1209
<b>22/11/2022</b>	2178
<b>23/11/2022</b>	1600
<b>24/11/2022</b>	1265.765
<b>25/11/2022</b>	1175
<b>28/11/2022</b>	1710.5
<b>29/11/2022</b>	1774.16
<b>30/11/2022</b>	1313.33
<b>1/12/2022</b>	1479.165
<b>5/11/2022</b>	1526.5
<b>6/11/2022</b>	1445
<b>7/11/2022</b>	1697.5
<b>8/11/2022</b>	1560
<b>9/11/2022</b>	1600
<b>Promedio</b>	1618.23



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMA T4  
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 29 de agosto de 2023

**DR. DANIEL MORALES GUZMÁN**  
**DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ**  
**MTRO. LUCIANO SANDOVAL YOVAL**  
**DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ**  
**DRA. YOLANDA FLOREZ VELÁZQUEZ**  
**P R E S E N T E**

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de **TESIS** titulado: **EVALUACIÓN DEL PRODUCTO PB8055 (SUPLEMENTO NUTRICIONAL) EN UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.**

Dirigida por el **Mtro. Luciano Sandoval Yoval**

Que presenta (el) o (la) **C. BRENDA ORIHUELA MARTÍNEZ**, del programa educativo de la **LICENCIATURA en INGENIERÍA QUÍMICA.**

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA**

Se anexa firma electrónica

### D I C T A M E N

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE
Aprobatorio	<b>DR. DANIEL MORALES GUZMÁN</b>
Aprobatorio	<b>DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ</b>
Aprobatorio	<b>MTRO. LUCIANO SANDOVAL YOVAL</b>
Aprobatorio	<b>DRA. JOSEFINA VERGARA SÁNCHEZ</b>
Aprobatorio	<b>DRA. YOLANDA FLOREZ VELÁZQUEZ</b>

Se anexan firmas electrónicas de cada revisor, en las cuales se incluye la fecha y hora que se ha emitido el voto aprobatorio.

VALH/fmg

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209,  
Tel. (777) 329 7000, Ext. 7039, fcqei@uaem.mx



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2023-08-29 23:29:06 | Firmante

IQuQP5Q8fm1ZJ2nUfzycss4MLLxc638P7ztABpZOqlzLmg2a417QfQFk7nyYlQTz9U3PQH3Dl8Auelkm9YK9/Y3nEuem/EyZbA4iSssepfMDGrSzNFVPpaI9ABkAPvAwLWSj+gwxlmDR+KxVCaS0VbxGJFkcanxL12ktpm7IYiG5nv+Vsxho+wwjWGHGzQQ0hJcSkBns7pZPKjBLc5OB2OCQxPr0oNg7UDY2cYoWLCtswpHGQiqiHjf2ZH5gOovILU2+ZDYvkmfW4BUK32Uwk8ulmQGOTDsbOxduXM1qBcq+p1lhmlxzeXEjd11j9ElisuyGqEOaUAmE/NsLk3nzTg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[MOxYuvhd2](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/CHWOoo5Sn7knueMqIA2S2QBAf3i0pUii>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**LUCIANO SANDOVAL YOVAL | Fecha:2023-08-31 13:23:16 | Firmante**

XlnwEsqj29CAVHQgoACJ54AilpKgnOBCx1jjZ7RupPsY28ZKcAG8NVeahVrl8kP+QpddO9UDuHOPF8NsThF0nvFApVBUfY39CbJCvAMANLQKWfPjXlvzrPbzI8FkEZeLsmudB2OS8R1ilxBQpYqVOQHEaGvGFP6lpilhbTs70bS5vdf/ZD01RwkSy+Oml3+LLB6h2jTfQf/roosfrfWFdGjYUafzGVWpyO9hKcz4eHJhwjD2Nexj84fReMPPiVd7QPg2lx9znnlAKCpd+5if2CTxB3dGj5XHpnidCf6+898TsCoWki8h7xcFn73/QILwGMECGsAD4YlcZkYPZZy7w==

**ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2023-09-03 15:09:29 | Firmante**

oyC+AYeD++HEpQRIMl+mjuAgw55EeCRmVeNYh3fYFbh+90U8VlnSAKI0DBf78VCy/Th/EMoiAQvZ11GjkFcr9b9AgGjRUp3uXS2k4Y1mXfGpDVATIau5naXo9LzML139talBSvmqVQMMyA7aLairZcVStluCXxUE7hSv11mNHBTVGJ6VKRFsrtrvtr0NieVrzKeQoNoI8+HuXYtQ3qd0q7akBV9dvL6fOh5G2R8X8lPhycycl8BGSk2HpZtdqalrilO0gkeZ56cfsPUoNeuBniTOQGw8bKqBOD+j6CYBdNqOajlfs/S9sQ7UHqPC/qUDjUm+s45Ju8BpOt6KWRD6vg==

**JOSEFINA VERGARA SANCHEZ | Fecha:2023-09-06 08:53:05 | Firmante**

dRzJuAuExANg/CCfukcBDsbm5bpmz/XznZWY74LjKN0/Zjdfg73UjyOYoOnPI313vYc4sVal3eVDagZ3UvONGqP7g5OBopB1QU9HR3AEyRg2UE7VAQDgFFgYPNPdIIHE5yGaJO8TjdcptpaDLpvWh71T3Hdgn9ijOo11XwXkSB1q4YqjZYvYSlDnGk6zKoRQT114nIbOmY+qJQ/NbZAnRVUL+wPkW69V1cZYtOYvRRNUFRcNRSzMuKo+M2NphsNsvnZrqVCT/E4mcUVBjsBTbR9HKE3srZ/INmARypkSuYFOX8qS2aYc+htiOPNoDa9PKAYw112JQpR+JrvuGPngnA==

**DANIEL MORALES GUZMAN | Fecha:2023-09-19 13:39:48 | Firmante**

UH/BmKXUvgtylmQ4frhTqpluNuhIUuCmuglK+2pkoZyhLjcbCchdeAvHxSEkw2aw6y/XwFm6DFmPvOmQiRN0oUDPvMZUBPTUxecTKK76ExucTRFOuX69WYCTFSuQdmb+9+NxVWiBFi3/3c19zHoeKUaSXfhrGXwlt8a9waTGNHZgThlbZihJXwK1NltHrZjFgSYOk74TUBToechCDzXBLU9ZCGVWHLkuzhlgxAO5/uwb+LqT+uw5gu7kZkcafb6Vz41S73d3BaS1NciUi500ZDJJf52LX9TjoFNovz72iYqwYxtaQmoHEJwc8tHkRYbdQyEjw0vUyDb7KekA==

**YOLANDA FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2023-09-25 16:41:04 | Firmante**

na4tbiNNRhCzVkp8eudZT/U/z2vkiEmI+uoo2XnweKK4z7ESUWuXyft2cMU6n+VOS8xAu7rTZ4wafuKQH5pEHcDbsjBLtARzppA9/k9lhWGKyaJmXJ34IGnmd5GmaRF0g1JVsgH/+M61n3ViNAhKS9D2IAUeSwpeJ6llkL5OlVH5cxx2E10SlnxAwwbyDqs1maCvPZe8AFNLW1cn+VsLAQjqq0oSUZHunZxlvtxA57NJAeCrDGuxrkMBr23yATU1Bhijwa961Ep/FKeiRfR63LZFPb9INC/1UamelGe0nKf2BCKzP7tacnRTcThzBRogFCpM0WoHGeUA+ATHaQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



izGmUPyRA

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/mqKj3m26ebvG9sSwFDk5DTMGPFdXpMV>

