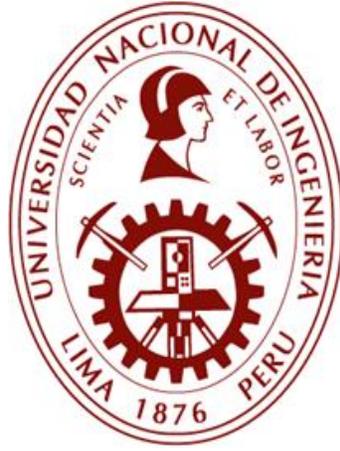


Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

“Evaluación de la reducción de sólidos suspendidos en el efluente y determinación de la fracción orgánica de lodos acumulados en un reactor UASB-TS”

Para obtener el título profesional de Ingeniero Sanitario.

Elaborado por

JHERSON DINO V PAYTÁN ORDOÑEZ

 [0009-0004-8395-202X](https://orcid.org/0009-0004-8395-202X)

Asesora:

DRA. ING. ROSA ELENA YAYA BEAS, Ph. D

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

LIMA - PERÚ

2024

Citar/How to cite	Paytán Ordoñez [1]
Referencia/Reference	[1] J. Paytán Ordoñez, <i>“Evaluación de la reducción de sólidos suspendidos en el efluente y determinación de la fracción orgánica de lodos acumulados en un reactor UASB-TS”</i> [Tesis de grado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Paytán, 2024)
Referencia/Reference	Paytán, J. (2024). <i>“Evaluación de la reducción de sólidos suspendidos en el efluente y determinación de la fracción orgánica de lodos acumulados en un reactor UASB-TS”</i> [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

DEDICATORIA

Al tortuoso camino de unos padres que buscaron un futuro diferente para sus hijos

A mi pareja Emily Chero, que día y día se sienta al lado mío, viendo el proceso de la redacción de la investigación.

A mis hermanos por no dejar de creer en mí y apoyar mis sueños.

Agradecimientos

Al personal de CITRAR-FIA-UNI por el apoyo en la realización de esta investigación.

A la Doctora Rosa Elena Yaya, por la asesoría en todos los procesos de la investigación.

A la señora Margarita, por su paciencia en los días de laboratorio y su apoyo constante en todo cuanto se hizo necesario.

Resumen

La investigación se centra en determinar la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente y determinar la fracción orgánica en el lodo acumulado en un reactor UASB-TS, investigación fue llevada a cabo durante los meses de junio de 2022 a enero del 2023, en la planta de tratamiento del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR-FIA-UNI), la cual capta las aguas de los asentamientos humanos El Ángel y El Milagro.

Se contabilizaron en total 3 etapas de monitoreo; considerando la primera de arranque por un periodo de 4 meses posterior a la inoculación del lodo anaerobio; la segunda etapa se trabajó con un caudal de 0.10 l/s y TRH de 11 h y 6 min; duró un periodo de 3 meses; y la tercera etapa con un caudal a 0.05l/s, y TRH de 22 h y 12 min por un periodo de 2 meses.

Para la primera etapa los valores son muy dispersos por lo cual no ha sido considerado dentro de los resultados de evaluación; para la segunda etapa se obtuvo una eficiencia promedio de remoción de DBO de $34.45 \pm 12.27\%$, sólidos suspendidos totales (SST) del 66%, y la fracción orgánica del lodo es de 51.22%; y para la tercera etapa se obtuvo una eficiencia promedio de remoción de DBO de 45% (112 mg/L), de sólidos suspendidos totales del 75%, y la fracción orgánica en los lodos es de 52.78%.

Palabras clave – Sólidos suspendidos totales (SST), fracción orgánica, lodo anaerobio, tiempo de retención hidráulica (TRH), reactor UASB-TS.

Abstract

The investigation focuses on determining the efficiency in the removal of total suspended solids in the effluent and determining the organic fraction in the accumulated sludge in a UASB-TS reactor, the investigation was carried out during the months of June 2022 to January 2023, at the treatment plant of the Wastewater Treatment Research Center (CITRAR-FIA-UNI), which captures water from the El Ángel and El Milagro human settlements.

A total of 3 monitoring stages were counted; considering the first start-up for a period of 4 months after the inoculation of the anaerobic sludge; the second stage was worked with a flow rate of 0.10 l/s and HRT of 11 h and 6 min; shown a period of 3 months; and the third stage with a flow rate of 0.05l/s, and TRH of 22 h and 12 min for a period of 2 months.

For the first stage, the values are very dispersed, which is why it has not been considered within the evaluation results; For the second stage, an average BOD removal efficiency of $34.45 \pm 12.27\%$ was obtained, total suspended solids (TSS) of 66%, and the organic fraction of the sludge is 51.22%; and for the third stage, an average removal efficiency of BOD of 45% (112 mg/L) was obtained, of solids in suspension of 75%, and the organic fraction in the sludge is 52.78%

Keywords – Total Suspended Solids (TSS), organic fraction, anaerobic sludge, hydraulic retention time (HRT), UASB-TS reactor.

Tabla de Contenidos

Resumen	V
Abstract	VI
Introducción	XIII
Capítulo I. Parte introductoria	- 1 -
1.1. Generalidades	- 1 -
1.2. Descripción del problema de investigación	- 1 -
1.3. Objetivos del estudio.....	- 2 -
1.3.1. Objetivo general.....	- 2 -
1.3.2. Objetivos específicos	- 2 -
1.4. Antecedentes investigativos.....	- 2 -
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	- 6 -
2.1. Marco teórico	- 6 -
2.1.1. Aguas residuales	- 6 -
2.1.1.1. Niveles de tratamiento de aguas residuales.....	- 6 -
2.1.1.2. Reactor anaerobio de flujo ascendente – UASB	- 8 -
2.1.1.3. Tanque séptico	- 11 -
2.1.1.4. Sólidos suspendidos totales (SST).....	- 12 -
2.1.1.5. Producción y transformación de DQO a metano	- 13 -
2.1.1.6. Lodos.....	- 16 -
2.2. Hipótesis.....	- 21 -
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	- 22 -
3.1. Ubicación del reactor UASB-TS	- 22 -
3.2. Afluente del reactor UASB-TS.....	- 22 -
3.3. Reactor UASB-TS.....	- 24 -
3.4. Etapas de la investigación.	- 25 -

VIII

3.4.1. Acondicionamiento del área de estudio.....	- 25 -
3.4.2. Inoculación de lodo anaerobio	- 25 -
3.4.3. Adaptación del sistema de captación de biogás.....	- 26 -
3.5. Parámetros evaluados y puntos de monitoreo	- 27 -
3.6. Frecuencia y cronogramas de monitoreo	- 27 -
3.6.1. Frecuencia de monitoreo	- 27 -
3.6.2. Cronograma de monitoreo	- 28 -
3.7. Procedimiento de monitoreos.....	- 29 -
3.7.1. Turbiedad.....	- 30 -
3.7.2. pH.....	- 30 -
3.7.3. Oxígeno disuelto y temperatura del agua residual	- 30 -
3.7.4. Temperatura ambiente y humedad relativa	- 30 -
3.7.5. Producción de metano	- 31 -
3.7.6. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	- 32 -
3.7.7. Sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles en el agua residual.....	- 33 -
3.7.8. Sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles del lodo.....	- 34 -
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	- 36 -
4.1. Resultados de la investigación.....	- 36 -
4.1.1. Turbiedad.....	- 37 -
4.1.2. pH.....	- 38 -
4.1.3. Temperatura	- 38 -
4.1.4. Oxígeno disuelto	- 39 -
4.1.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	- 39 -
4.1.6. Sólidos en agua residual.....	- 40 -
4.1.6.1. Sólidos totales, sólidos fijos totales y sólidos volátiles totales	- 41 -

IX

4.1.6.2. Sólidos suspendidos totales, suspendidos fijos y suspendidos volátiles.....	- 43 -
4.1.6.3. Sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles	- 46 -
4.1.7. Sólidos en lodos y fracción de materia orgánica	- 48 -
4.1.8. Producción de metano	- 51 -
4.2. Discusión de los resultados	- 52 -
4.2.1. Sólidos en agua residual.....	- 52 -
4.2.1.1. Sólidos totales.....	- 52 -
4.2.1.2. Sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles	- 53 -
4.2.2. Determinación de la fracción orgánica (SVT/ST) en lodos	- 54 -
4.2.3. Demanda bioquímica de oxígeno DBO	- 54 -
4.2.4. Producción de metano	- 55 -
4.2.5. Turbiedad.....	- 58 -
4.2.6. pH.....	- 58 -
4.2.7. Temperatura	- 59 -
4.2.8. Cumplimiento de LMP'S Y ECA'S	- 61 -
Conclusiones	- 63 -
Recomendaciones	- 65 -
Referencias Bibliográficas	- 66 -
Anexos	- 70 -

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química promedio del biogas	- 14 -
Tabla 2. Caracterización y composición de lodos	- 17 -
Tabla 3. Características del afluente del reactor UASB-TS.....	- 23 -
Tabla 4. Frecuencia de monitoreo de parámetros.....	- 28 -
Tabla 5. Etapas de monitoreo de la investigación.....	- 28 -
Tabla 6. Condiciones de operación por etapas	- 29 -
Tabla 7. Resumen de procedimientos de monitoreo	- 29 -
Tabla 8. Procedimiento de medición de Biogas	- 31 -
Tabla 9. Resumen de valores máximo mínimos y promedios de parámetros analizados ..	- 36 -
Tabla 10. Valores promedios, máximos y mínimos de sólidos totales, sólidos fijos totales y sólidos volátiles totales.	- 43 -
Tabla 11. Valores promedios, máximos y mínimos de sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles.	- 45 -
Tabla 12. Valores promedio, máximos y mínimos de sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles.....	- 48 -
Tabla 13. Sólidos en lodos anaerobios presentes en el reactor UASB-TS.....	- 50 -
Tabla 14. Promedio de concentración de sólidos en los lodos presentes en el reactor UASB-TS.....	- 51 -
Tabla 15. Valores promedio de Producción de metano en el reactor UASB-TS.....	- 52 -
Tabla 16. Porcentaje de conversión de DQO a metano (CH ₄).....	- 56 -
Tabla 17. Comparativa de LMP, ECA's y Valores medidos en el efluente del reactor UASB-TS.....	- 62 -
Tabla 18. Resultados de determinación de sólidos totales, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS.....	- 8 -

Tabla 19. Resultados de determinación de sólidos en suspensión, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS - 9 -

Tabla 20. Resultados de determinación de sólidos disueltos, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS..... - 10 -

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Eficiencia de remoción de turbiedad del reactor UASB-TS	- 37 -
Gráfico 2. Variación de pH en el reactor UASB-TS	- 38 -
Gráfico 3. Variación de temperatura, T° ambiente y humedad relativa.....	- 39 -
Gráfico 4. Evolución de remoción de DBO en el reactor UASB-TS	- 40 -
Gráfico 5. Eficiencia en la remoción de sólidos totales en el reactor UASB-TS.....	- 41 -
Gráfico 6. Eficiencia en la remoción de sólidos fijos totales en el reactor UASB-TS.....	- 42 -
Gráfico 7. Eficiencia en la remoción de sólidos volátiles totales en el reactor UASB-TS ...	- 42 -
Gráfico 8. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales en el reactor UASB-TS ...	-
44 -	
Gráfico 9. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos fijos en el reactor UASB-TS.-	44 -
Gráfico 10. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el reactor UASB-TS	
.....	- 45 -
Gráfico 11. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos totales en el reactor UASB-TS	- 46 -
Gráfico 12. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos fijos en el reactor UASB-TS	- 47 -
Gráfico 13. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos volátiles en el reactor UASB-TS-	47
-	
Gráfico 14. Sólidos presentes en los lodos del reactor UASB-TS y Fracción Orgánica	
(SVT/ST).....	- 49 -
Gráfico 15. Producción de metano en reactor UASB-TS.....	- 52 -
Gráfico 16. Porcentaje de conversión de DQO consumido en reactor a metano (CH ₄)	- 58 -
Gráfico 17. Comparativa de evolución de parámetros, con respecto al aumento de la	
temperatura ambiental	- 60 -

Introducción

El escaso nivel de cobertura de sistemas de tratamiento en zonas rurales del país y de gran parte de Sudamérica, así como también en zonas urbanas de poblaciones pequeñas, hacen necesaria la implementación de sistemas cada vez más económicos y que demanden en menor medida de la mano de obra calificada para su operación y mantenimiento, y de áreas menores de construcción.

Por otro lado, el desconocimiento del funcionamiento de las nuevas tecnologías que se van presentando en los últimos años, pero que no han sido investigadas en la región, hace que la inversión en proyectos nuevos no sea muy aceptada bajo las normativas de las entidades gubernamentales, haciendo de este modo que las alternativas tecnológicas sean reducidas, y obligando de este modo la utilización de tecnologías que posiblemente no sean las más apropiadas para el sistema de demanda, o los costos de inversión y de operación y mantenimiento sean altos lo cual podría significar la disminución de las eficiencias del sistema de tratamiento, haciendo que los sistemas de tratamiento no cumplan del todo el fin para el que fueron implementadas, hablando principalmente sobre la disminución de la contaminación de los cuerpos receptores.

Debido a esta problemática, la presente investigación pretende evaluar la eficiencia de un reactor UASB-TS a fin de permitir que esta tecnología pueda ser considerada para implementación en proyectos a fin como una tecnología de pretratamiento.

Capítulo I. Parte introductoria

1.1. Generalidades

En la actualidad en el Perú y a nivel de toda Sudamérica se han implementado numerosas plantas de tratamiento de aguas residuales, de estas plantas la mayoría son plantas convencionales, con costos de construcción y operación elevados, haciendo que este tipo de sistemas no sean adecuados para las zonas rurales.

De esta manera nace la necesidad de encontrar nuevos métodos que puedan cubrir con aquellas carencias, motivo por el cual se están probando nuevas tecnologías que se adapten a las realidades social y económica de cada población; la tecnología propuesta en esta investigación trata en cierta manera de mejorar las condiciones expuestas anteriormente, ya que ofrece un sistema de bajo costo operativo y constructivo (prefabricación a escala) y que ayuda enormemente a mejorar las condiciones de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito rural.

1.2. Descripción del problema de investigación

En la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel global se ha presentado la problemática de la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en tratamiento primarios y/o pretratamientos, los cuales al no ser reducidos a niveles manejables pueden afectar procesos posteriores, y de los cuales depende directamente la producción de lodos en cada proceso.

En este contexto es que han surgido diferentes tipos de tecnologías, entre ellas la del reactor UASB-TS, que responden a la necesidad de contar con tratamientos primarios que incluyan costos de operación menores, y que permitan la remoción de estos parámetros de manera eficiente; debido a esto y a que la mayor parte de las investigaciones hechas

anteriormente están centradas a la remoción de carga orgánica es que se presenta la necesidad de poder evaluar este reactor para estos parámetros.

Del mismo modo las características que se producen en los reactores tienden muchas veces a ser muy inestables, lo cual para su disposición o reutilización se busca que cumplan con ciertas condiciones de estabilidad.

1.3. Objetivos del estudio

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas compuesto por un reactor UASB-TS, mediante la determinación de las eficiencias de remoción de carga orgánica¹, sólidos suspendidos totales (SST) y la determinación de la fracción orgánica presente en el lodo acumulado².

1.3.2. Objetivos específicos

En esta investigación se plantearon los siguientes objetivos secundarios.

- ✓ Determinar la reducción de sólidos totales, sólidos volátiles totales, y sólidos suspendidos totales en el afluente y efluente del reactor.
- ✓ Determinar la concentración de sólidos totales y sólidos volátiles totales en los lodos que se producen dentro del reactor.
- ✓ Determinación de la carga orgánica (Kg DBO/día) en el reactor.

1.4. Antecedentes investigativos

La tecnología del reactor UASB-TS es relativamente nueva, se presentó por la necesidad de adaptar los conocidos tanques sépticos, que son de uso masivo en algunos

¹ En términos de Kg DBO/día

² En términos de la relación SVT/ST

países europeos y en Norte América, a fin de que permitan una mayor remoción de carga orgánica y permitir unos tiempos de retención hidráulica (TRH) menores.

La primera vez que se habló de un reactor que fusionaba la tecnología de un Tanque Séptico a la cual se le adicionaba un flujo vertical correspondiente a un reactor UASB, fue en el año 1993 en Holanda, la cual se llevó a cabo por los investigadores J.J. Bogte, A.M. Breure, J.G. Van Andel y G. Lettinga, los que arrojaron buenos resultados en cuanto a la remoción física de sólidos suspendidos totales y conversión biológica de sólidos disueltos para aguas en condiciones de temperatura de entre 8°C y 15°C.

La variación que experimentó Lettinga (1991) al modificar a flujo ascendente, y considerar cámaras separadas para la recolección de biogás, aguas de ingreso y salida; hicieron que se obtuvieran resultados muy positivos para este nuevo modelo de tecnología.

Metcalf & Eddy (2005), muestra resultados de rendimiento de un sistema de tratamiento para pequeñas poblaciones (fosa séptica) con flujo ascendente, en la que se obtienen resultados en eficiencia de remoción de DBO de entre 30 a 40% y de sólidos suspendidos totales que llegan hasta los 80%.

En nuestro país se hicieron investigaciones enfocadas en la remoción de carga orgánica. En el año 2013 la Universidad Nacional de Ingeniería hizo una investigación en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Carapongo, administrada por SEDAPAL, para las cuales fueron evaluadas las aguas residuales domésticas provenientes de la zona de Huachipa en la que pudieron determinar eficiencias en la remoción de DQO_{tot} entre 33 y 40% en las unidades que fueron instaladas.

Por otro lado también se hicieron investigaciones en el año 2017 en la Universidad Nacional de Ingeniería, dentro de las instalaciones del Centro de Investigación de Tratamiento

de Aguas residuales (CITRAR-FIA-UNI), en las que se evaluaron las aguas residuales domésticas provenientes de las localidades denominadas El Milagro y El Ángel, adyacentes a la planta. En dicha investigación se obtuvieron eficiencias de hasta 68% en la remoción de DQO, pero las eficiencias en la remoción de coliformes termotolerantes es muy baja.

Investigaciones más recientes muestran tanques sépticos con flujo ascendente con condiciones similares a las de un biodigestor; Por ejemplo, Meza (2018), realizó una investigación en la ciudad de Lima, en los que aprecia que, para condiciones temperaturas por encima de los 16°C, y con un caudal de 8.52 m³/d se obtuvieron eficiencias de remoción de 23.73% de DBO y 80.78% de remoción de sólidos suspendidos totales.

Aguirre, Vargas y Zeron (2018), determinaron para una temperatura superior a los 18°C y un clima con humedad relativa por debajo del 60% con un caudal de 0.50 m³/d, bajo condiciones de operación del reactor construido, los siguientes resultados: 50% de remoción de DBO, 45% de remoción de DQO y 72.44% de remoción de Sólidos suspendidos totales.

Metcalf & Eddy (1995), muestra la composición típica del lodo anaerobio de digestión primaria, la cual tiene valores en porcentaje de sólidos volátiles totales (SVT) con respecto a los sólidos totales (ST) que van del rango de 30 a 60 % siendo un valor típico 40%.

Jara (2018), realizó un estudio sobre la estabilización química del lodo por medio de aplicación de cal, dentro de las instalaciones del CITRAR-FIA-UNI, en la que determinaba en función de un reactor anaerobio de flujo ascendente el volumen de sólidos volátiles totales (SVT), en comparativo con el volumen total de sólidos en muestras de lodo, del cual se obtuvo un el valor de la fracción orgánica (SVT/ST) de 49.19%.

En la actualidad en el Perú y a nivel de toda Sudamérica se han implementado numerosas plantas de tratamiento de aguas residuales, de estas plantas la mayoría son

plantas convencionales, con costos de construcción y operación elevados, haciendo que este tipo de sistemas no sean adecuados para las zonas rurales (SUNASS, 2022)

Salazar (2005) afirma que “para pequeñas localidades rurales, los métodos convencionales son impracticables (...) bajo este contexto surge la necesidad de buscar algún método alternativo al convencional, que lo haga económicamente factible y autosustentable”.

Como se ha mencionado líneas arriba, todas las investigaciones son enfocadas a la remoción de la carga orgánica en temperaturas que varían de 16°C a 32°C, por lo cual es necesario hacer la investigación de parámetros adicionales que permitan conocer mejor el desempeño de dicho reactor, y teniendo como base que las investigaciones descritas han mostrado un rango de valores muy similares, que demuestran en promedio un rango de entre 50 a 60% en remoción de DBO y un rango de entre 70 a 80 % en remoción de sólidos suspendidos totales (SST), al igual que el valor de la fracción orgánica del lodo en un rango de 40 a 60%.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1. Marco teórico

2.1.1. Aguas residuales

Las aguas residuales se definen como las aguas de rechazo que se producen en diversos tipos de actividades, ya sea de origen municipal (doméstica, comercial, etc.) como también de origen industrial (producción o limpieza), estas aguas se caracterizan principalmente por contener sustancias orgánicas e inorgánicas cuya caracterización hace posible la implementación de metodologías de tratamiento cada vez más modernas y que se adaptan a las demandas de los nuevos tiempos (Lorenzo & Obaya, 2006)

2.1.1.1. Niveles de tratamiento de aguas residuales

La complejidad de la composición de las aguas residuales genera que el tratamiento de estas se realice por niveles, los cuales permiten, de acuerdo con un objetivo prefijado, un nivel de tratamiento según convenga para el efluente resultante. Los niveles de tratamiento se clasifican como se indica a continuación:

2.1.1.1.1. Pretratamiento o tratamiento preliminar

El objetivo principal de este nivel es la retención y remoción ya sea manual o mecanizado de sólidos gruesos, finos cuya densidad sea mayor a la del agua residual y en algunos casos también las grasas y aceites (Lorenzo & Obaya, 2006). A demás resaltar que este nivel es el único que no presenta ningún proceso biológico o bioquímico que podría ser considerado resaltante.

2.1.1.1.2. Tratamiento biológico

Dentro del cual se encuentran diferentes niveles en serie, cuyo principio general es promover condiciones para generar el tipo de tratamiento biológico que los identifica, dentro

de estos se encuentran desde el nivel primario hasta el terciario, cuyas características principales son las siguiente:

El tratamiento primario se caracteriza principalmente por la remoción de materia en suspensión, a excepción del material coloidal o disuelto. Este tipo de tratamiento logra eficiencias pico de hasta 70% de remoción de sólidos suspendidos totales y 30% de remoción de DQO (Demanda Química de oxígeno).

El tratamiento secundario y terciario basan sus principios en reacciones bioquímicas generadas por microorganismos y cuyas eficiencias son muy superiores al primario.

2.1.1.1.3. Desinfección

Se realiza para la reducción o eliminación de bacterias y virus que persistan en el agua residual tratada y como paso previo a su disposición final, este proceso puede realizarse empleando diversos métodos, entre los principales tenemos la cloración, como la más económica y sostenible; la ozonización y la radiación ultravioleta.

2.1.1.1.4. Tratamiento de lodos

Existen diversos métodos de tratamiento para lodos residuales, las principales tecnologías y procesos son los siguientes: espesamiento, deshidratación, secado, reducción térmica, oxidación por vía húmeda, haciendo uso de un reactor vertical de pozo profundo (Metcalf & Eddy, 1995, pág. 886).

Para fines de la investigación se tomarán en cuenta diversos conceptos a cerca de la determinación de la fracción orgánica, principalmente en el reactor UASB-TS.

2.1.1.2. Reactor anaerobio de flujo ascendente – UASB

El reactor anaerobio es en términos generales un reactor Imhoff con el flujo inverso, es decir de abajo hacia arriba, el funcionamiento de este sistema consiste en un ingreso superior por medio de una caja de distribución, del cual, por medio de tuberías se dispersa a lo largo y ancho de todo el fondo del reactor.

Este reactor comprende 3 zonas principales: zona de lecho de lodos, zona de manto de lodos, zona separación líquido, sólido y gas.

El tratamiento se produce al ingresar el agua por el manto de lodos, en el que se encuentran partículas biológicas o también conocidas como biosólido, producto de esta digestión en condiciones anaerobias se producen biogases, compuestos en mayor porcentaje por metano (CH₄) y dióxido de carbono CO₂, y varios otros compuestos en concentraciones menores; estos gases son capturados en los recolectores de gas, desde los cuales se puede realizar un tratamiento adicional para su aprovechamiento o simplemente se quema para evitar su liberación (CONAGUA MX, 2011).

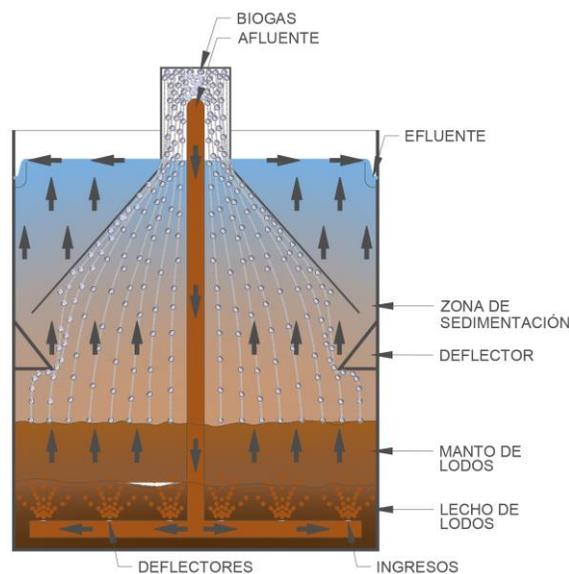


Ilustración 1. Esquema de funcionamiento reactor UASB

FUENTE: (Becerra, Correa, & Moreno, 2022)

El gas liberado se adhiere a las partículas de lodo, y ascienden con estas hasta chocar con las pantallas deflectoras, lo cual provoca que en la zona de manto de lodos se encuentre este último en suspensión, esto se logra en parte debido a que la velocidad de ascenso del agua residual se encuentra en el rango de 0.6 a 0.9 m/s.

Según Lorenzo & Obaya (2006), la idea básica de este proceso es que el lodo anaerobio tenga buenas características de sedimentación, si le son favorables las condiciones físicas y químicas del proceso de solidificación; si se logran estas condiciones, la retención del lodo, o sea, los microorganismos, dependerán principalmente de una separación efectiva del gas producido en el proceso; esto en resumen significa principalmente que la acumulación efectiva del lodo deberá darse principalmente por sedimentación de la misma, lo cual permitirá que el lodo que se forme sea un lodo granulado, el cual es el ideal para este tipo de reactor.

2.1.1.2.1. Condiciones de operación efectiva del reactor UASB

A fin de que el reactor pueda lograr una buena operación, se deben considerar las siguientes condiciones (Lorenzo & Obaya, 2006).

- ✓ Buena disponibilidad de Nutrientes, temperatura, pH.
- ✓ La concentración de biosólido deberá ser la mayor posible, motivo por el cual en la mayoría de ocasiones es necesario realizar una inoculación de lodo, o emplear la recirculación del mismo por gravedad y asegurando que este lodo presente buena actividad biológica, el cual se consigue realizando muestreos a diferentes alturas del manto de lodos.
- ✓ La acumulación de lodo anaerobio es lenta, con periodos de acumulación efectiva que pueden ir desde los 6 meses hasta 1 año.
- ✓ La velocidad de ascenso deberá estar en el rango recomendado de 0.6 a 0.9 m/h, esto condicionará que el tiempo de retención hidráulico en el reactor sea menor, lo cual

permite la mayor expansión del manto de lodos. Esta velocidad influye positivamente en la eficiencia de remoción de la materia carbonacea del reactor. La velocidad de ascenso, ayuda a la buena distribución de los afluentes haciendo que estos estén distribuidos de la manera más homogénea posible.

- ✓ La cantidad de lodo que se genere en la zona de dispersión o manto de lodos estará estrechamente relacionada con la cantidad de biogás que se produzca en el lecho de lodos, y mientras mayor sea la cantidad de lodos en la zona de dispersión la degradación biológica será mayor, he ahí donde radica la importancia de un buen diseño del reactor.

2.1.1.2.2. Ventajas y desventajas de un reactor UASB

Ventajas

- ✓ Bajo o nulo consumo eléctrico
- ✓ Baja producción de lodos, lo cual disminuye los costos de tratamiento.
- ✓ Producción de Biogás, que puede ser transformada en energía eléctrica.
- ✓ Soporta altas cargas orgánicas e hidráulicas, y los lodos pueden estar periodos largos de tiempo sin alimentación, por tal motivo esta tecnología podría ser utilizada de forma efectiva en industrias que tengas descargas de forma cíclica.
- ✓ Los costos de construcción, operación y mantenimiento son bajos.

Desventajas

- ✓ Los procesos biológicos que se producen dentro del reactor son sensibles a cambios de temperatura y condiciones operativas.
- ✓ Larga etapa de adaptación, y lenta formación de lodos anaerobios para el arranque, motivo por el cual es recomendable la inoculación.
- ✓ Sensible a presencia de compuestos tóxicos.

- ✓ Baja o nula reducción de agentes patógenos.

2.1.1.3. Tanque séptico

La tecnología de tratamiento conocida como tanque séptico, consiste en un sistema muy básico de tratamiento de aguas residuales, la cual puede ser catalogada como un pretratamiento o como un tratamiento primario, dependiendo a las condiciones de diseño (Lorenzo & Obaya, 2006).

Este tipo de tecnología se usa principalmente para viviendas, en zonas rurales o con poblaciones pequeñas, debido a la demanda de volumen para su implementación (SUNASS, 2022).

Los tanques sépticos son un proceso del tipo anaerobio, aunque el fin de este es el diseño, ya que el diseño básico únicamente permite la sedimentación de sólidos por gravedad, a este se le puede realizar modificaciones para obtener condiciones de flujo ascendente que permitan una eficiencia similar a la de un reactor UASB, aunque este se caracterice principalmente por que el afluente ingresa de manera puntual y no de manera dispersa como en reactores anaerobios de flujo ascendente. El tiempo de retención hidráulica de estos reactores tiende a ser de un mínimo de 36 a 72 horas (Constantino, Morena, & Hernández, 2015).

Ventajas

- ✓ Costos de operación y mantenimiento bajos, no se necesita mano de obra tecnicada para su operación.
- ✓ Aplicable para edificaciones sin acceso a sistemas de alcantarillado público, haciendo hincapié en su uso para zonas rurales.
- ✓ Baja producción de lodos anaerobios.

Desventajas

- ✓ Complicada extracción de lodos, en ocasiones será necesario la implementación de un sistema de bombeo y/o cisternas de almacenamiento.
- ✓ Uso para volúmenes pequeños de aguas residuales.
- ✓ Uso exclusivo para sistemas domiciliarios, exceptuando su uso para industrias.

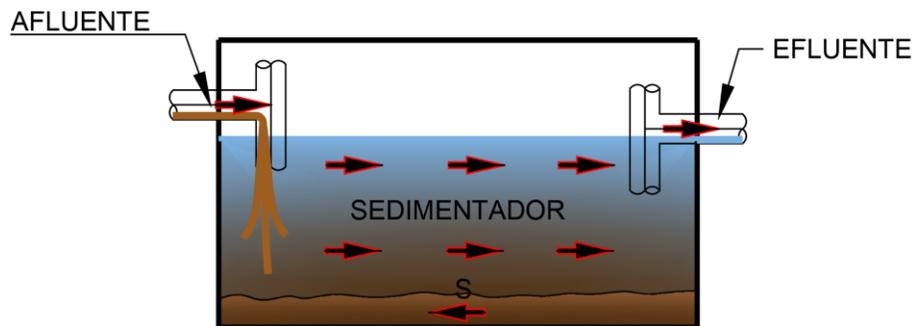


Ilustración 2. Esquema de funcionamiento de un tanque séptico.

FUENTE: (Organización Panamericana de la Salud, 2005)

2.1.1.4. Sólidos suspendidos totales (SST)

La importancia del estudio de los sólidos suspendidos totales (SST) radica en los posibles problemas, que la presencia de estos, podrían generar en el funcionamiento de los diferentes procesos de tratamiento (Metcalf & Eddy, 1995)

El reactor UASB podría alcanzar una eficiencia de remoción de hasta un 80% (CONAGUA MX, 2011), debido a este alto porcentaje en un tratamiento primario es que el reactor UASB es una de las tecnologías más eficientes en cuanto a costos y beneficios.

Los sólidos suspendidos totales son considerados a aquellos que se pueden filtrar haciendo uso de filtro de membrana de policarbonato de 1um y pasando un volumen del líquido por medio de este. (American Public Health Association, 2017)

2.1.1.5. Producción y transformación de DQO a metano

La degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias comprende diversas fases llevadas a cabo por diferentes tipos o grupos de microorganismos, las cuales son:

- ✓ Hidrólisis
- ✓ Acidogénesis
- ✓ Acetogénesis
- ✓ Metanogénesis

La hidrólisis es la primera fase y consiste en la degradación de los polímeros orgánicos complejos, donde se originan moléculas más sencillas (monómeros) (Guardia, 2012).

Posteriormente microorganismos productores de hidrógenos producen, en la digestión de estos monómeros, ácido acético, CO_2 , H_2 y ácidos grasos volátiles; estos últimos que serán la base para la siguiente fase, la metanogénesis, que consiste en la degradación de los productos de las fases anteriores por microorganismos anaerobios que producen metano (Bautista, 2010).

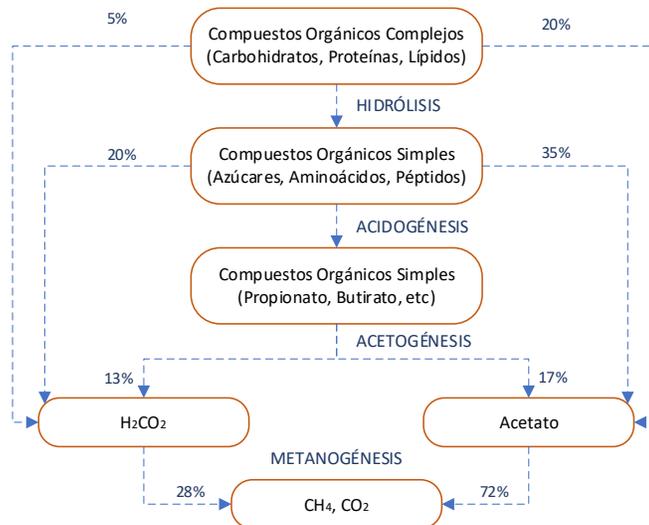


Ilustración 3. Fases de la digestión anaerobia

FUENTE: (Bautista, 2010)

Composición del Biogás

El biogás que se produce dentro de los reactores anaerobios está conformado por diferentes compuestos químicos, de los cuales se destacan el metano CH₄, en un porcentaje de entre 55% a 70%; y el dióxido de carbono (CO₂) en porcentaje de 30 a 45%, entre trazas de otros gases (MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF, 2011).

En la Tabla 1 se aprecia con mayor detalle la composición química del biogás.

Tabla 1. Composición química promedio del biogas

Gas	Porcentaje del Volumen Total
Metano CH ₄	54-70
Dióxido de Carbono, CO ₂	27-45
Sulfuro de hidrógeno, H ₂ S	0-0.1
Hidrógeno, H ₂	1-10
Nitrógeno, N ₂	0.5-3.0

FUENTE: (Guerrero, 2012)

Métodos de cuantificación de producción de metano.

La cuantificación volumétrica se puede realizar empleando diversos métodos; volumétrico, por indicador de combustión de gas y por análisis cromatográfico (Rossum & Villarruz, 1950), el método volumétrico desarrollado por la compañía Macmillan (Munroe & Nichols, 1929).

El método volumétrico es el más empleado a nivel experimental ya que los costos que este conllevan son relativamente bajos, y pueden ser practicados con regularidad, este método consiste en cuantificar un volumen de biogás captado en un periodo de tiempo "t", posteriormente este se metano producido se hará reaccionar con una sustancia desplazante, como es el caso del NaOH, el cual reacciona con el CO₂ presente y lo consume, haciendo que la medida de este volumen se asemeje en mayor medida a la del metano.

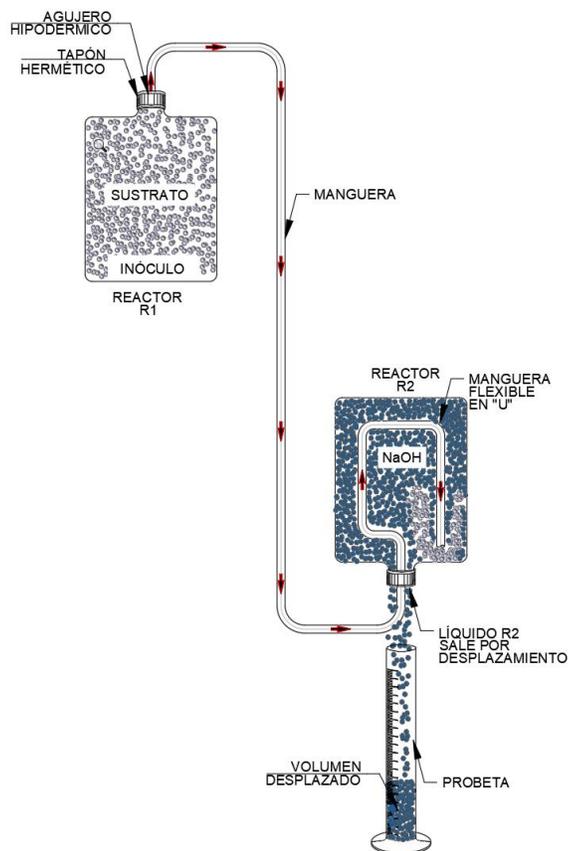


Ilustración 4. Esquema del Método Volumétrico

FUENTE: (Torres & Pérez, 2010)

Equivalencia de DQO en metano

En los procesos anaerobios, la materia orgánica no se degrada, se transforma, de este modo, los métodos radican principalmente en la actividad metanogénica específica, ya que la materia orgánica únicamente puede ser convertida en metano, motivo por el cual es más sencilla su cuantificación en reactores con estos principios.

Según De Lemos - Chernicharo (2007), la actividad metanogénica específica (AME) puede definirse como la máxima capacidad de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, realizada en condiciones controladas de laboratorio que permita la máxima actividad bioquímica de conversión del sustrato orgánico a metano.

De este modo se puede determinar la capacidad máxima de remoción de la DQO dentro de un reactor anaerobio, teniendo como dato la producción de metano que será captada volumétricamente, a nivel experimental se puede calcular la Actividad metanogénica de la siguiente manera:

$$A.M = \left(\frac{1}{F.C. \times W} \right) \times \left(\frac{dCH_4}{dt} \right)$$

Donde:

A.M : Actividad Metanogénica (gDQO/gSSV-d)

dCH₄/dt : Máxima tasa de producción de metano en el ensayo (ml CH₄/d)

w : Cantidad de biomasa en el ensayo (g SSV/l)

SSV : Sólidos Suspendidos Volátiles

DQO : Demanda Química de Oxígeno (g/l)

F.C : Factor de conversión (mlCH₄/g DQO)

La determinación del Factor de Conversión F.C. se hará tomando en cuenta la siguiente fórmula:

$$F,C = \left(\frac{1bar}{P} \right) \times \left(\frac{350mlCH_4}{grDQO} \right) \times \left(\frac{(372 + T) \times K}{273K} \right)$$

Donde:

P : Presión atmosférica local (bar).

T : Temperatura ambiente (°C)

2.1.1.6. Lodos

Los lodos se generan en todos los procesos de tratamiento de las aguas residuales, siendo estos uno de los principales problemas en la operación de las planta de tratamiento

debido a que (1) está formado, principalmente, por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas; (2) la fracción del lodo a evacuar, generada en el tratamiento biológico del agua residual, está compuesta principalmente por la materia orgánica presente en aquella, aunque en forma diferente a la original, que también está sujeta a procesos de descomposición que la pueden hacer indeseable, y (3) sólo una pequeña parte del lodo es materia sólida (Metcalf & Eddy, 1995).

El Conagua (2013) hace un análisis sobre el estado actual del tratamiento y disposición del lodo en el mundo, en el que se afirma que la disposición final de los lodos considera principalmente la disposición final en el suelo; en países desarrollados un 54% de la producción de lodos es dispuesta al suelo, en el caso de países en vías de desarrollo el porcentaje es mucho mayor, ya que las tecnologías de tratamiento están dadas principalmente por sistemas de digestión anaerobias y con disposición directa en el suelo.

El lodo resultante de los procesos de tratamiento debe someterse a un análisis para determinar sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosas, lo que permitirá precisar si el lodo es considerado como un residuo peligroso o no peligroso (Oropesa, 2006), la importancia de esta clasificación se da en la disposición que estos reciban, la composición de los lodos anaerobios está dada por la siguiente Tabla:

Tabla 2. Caracterización y composición de lodos

<i>Parámetro</i>	<i>Lodos primarios</i>	<i>Lodos secundarios (mezcla)</i>	<i>Lodos digeridos</i>
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV(%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%ss)	12-14	3-5	4-12
Proteínas /%ss)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%ss)	8-10	6-8	5.-8

<i>Parámetro</i>	<i>Lodos primarios</i>	<i>Lodos secundarios (mezcla)</i>	<i>Lodos digeridos</i>
Nitrógeno (%ss)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%ss)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterías patógenas (NMP/100ml)	103-105	100-1000	10-100
Metales pesados (%ss)(Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: (Hernandez, 1992, pág. 713)

2.1.1.6.1. Métodos de tratamiento de lodos

Los principales métodos de tratamiento de lodos son, Espesamiento, Estabilización, Acondicionamiento, Desinfección, Deshidratación, Secado y Reducción Térmica; La selección de la tecnología de tratamiento se hará de acuerdo a la caracterización de los lodos y el proceso de tratamiento (Metcalf & Eddy, 1995)

En una PTAR la selección de la tecnología de tratamiento se hará de acuerdo a la caracterización de los lodos y el proceso de tratamiento.

2.1.1.6.1.1. Estabilización del lodo

La estabilización del lodo o reducción del poder de fermentación, consiste en reducir su actividad biológica (tendencia a la putrefacción) y su contenido de microorganismos causantes de enfermedades (Oropesa, 2006).

La presente investigación se centrará en el método de estabilización, dentro de la cual se encuentran la estabilización con cal, tratamiento térmico, digestión anaerobia, digestión aerobio y compostaje, que son también las tecnologías más antiguas de tratamiento o estabilización de lodos.

El reactor UASB-TS ofrece un tratamiento para la estabilización de los lodos por digestión anaerobia, que ofrece además la reducción de masa de los lodos.

Según Noyola (2000), la digestión del lodo en el reactor anaeróbico tiene dos fases, (1) digestión ácida, cuando el pH baja a 5.5 y los microorganismos atacan las sustancias presentes en el lodo y se forman ácidos orgánicos, anhídrido carbónico y ácido sulfídrico y (2) la digestión alcalina, cuando el pH sube hasta 7.4, los productos de la primera fase se transforman en metano y dióxido de carbono.

Ventajas y Desventajas de la digestión anaerobia

Según (Metcalf & Eddy, 1995), Las principales ventajas y desventajas de la digestión anaerobia son las siguientes:

Ventajas

- ✓ Conversión de Sólidos Volátiles Totales SVT (40 – 60%)
- ✓ Reducción de la masa de lodos.
- ✓ Producción de biogás.
- ✓ Lodo resultante aplicable al suelo con restricciones sanitarias.
- ✓ Se eliminan malos olores.
- ✓ Costos de operación bajos.
- ✓ Sistemas de operación simple.
- ✓ Rentable para grandes volúmenes.

Desventajas

- ✓ El sistema es termosensible
- ✓ Lenta tasa de degradación biológica.

2.1.1.6.1.2. Parámetros para la determinación de la estabilización de lodos por digestión anaerobia

De acuerdo a lo indicado en párrafos anteriores, para la determinación de la estabilización del lodo por medio de un proceso de digestión anaerobia se considerarán los siguientes parámetros medibles:

- ✓ Determinación de coliformes termotolerantes (Palacios, 2021).
- ✓ Determinación de demanda química de oxígeno (Metcalf & Eddy, 1995).
- ✓ Determinación de actividad metanogénica (Lorenzo & Obaya, 2006).
- ✓ Determinación de fracción orgánica (Encarnación & Enrique, 2014).

La presente investigación se centrará en la determinación de la fracción orgánica debido a temas de presupuesto.

Fracción Orgánica presente en los lodos

El D.S. 015-2017 VIVIENDA indica, que el lodo deberá cumplir un proceso previo para su disposición, (1) Estabilizando la fracción orgánica del lodo, (2) Higienizando el mismo, (3) realizando y control y (4) obteniendo como producto final del biosólido, obteniendo de esta manera lodos de clase A y clase B de acuerdo a la clasificación de la EPA (Environmental Protection Agency).

La EPA (2002), clasifica los biosólidos de Clase A y Clase B, siendo ambas aceptadas para aplicación al suelo; pero, en el caso de la Clase A se aplica sin restricciones por contar con un tratamiento de higienización adicional y en el caso de la Clase B se consideran restricciones según la localización de los suelos, el tipo de cultivo, etc. Esto debido a que este lodo solo pasan un proceso de estabilización y pueden contener aún agentes patógenos.

Debido a la problemática que se describe en párrafos anteriores, nace la necesidad de medir el grado de estabilización de los lodos que se producen en el reactor UASB-TS, a fin de poder determinar si este lodo puede ser reaprovechado como biosólido de clase B.

La estabilización por digestión anaerobia está centrada principalmente en la reducción de su variante biológica, los sólidos volátiles totales para reducir el volumen del lodo para su disposición, la misma que convierte la fracción orgánica en metano o dióxido de carbono (Metcalf & Eddy, 1995), es aquí donde nace la importancia de la medición de concentración de materia orgánica en el lodo digerido dentro del digester anaerobio.

La fracción orgánica presente en el reactor UASB-TS se medirá de tomando como índice de representativo la fracción de sólidos volátiles totales con respecto a los sólidos totales (SVT/ST), siendo este un indicador del grado de digestión de materia orgánica de los lodos y se relaciona directamente con el grado de estabilización de lodos por digestión anaerobia (Palacios, 2021; Parra & Torres, 2016; Encarnación & Enrique, 2014; Metcalf & Eddy, 1995).

2.2. Hipótesis

El reactor UASB-TS tendrá una eficiencia en la remoción física de los sólidos suspendidos totales aproximada de entre 70 a 80% y la fracción orgánica en el lodo acumulado será menor a 55%.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Ubicación del reactor UASB-TS

El reactor UASB-TS fue instalado en la parte lateral del lecho de secado, adyacente al RAMLFA del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales (CITRAR-FIA-UNI) Ubicado en el sector “T” en la parte extrema norte del campus universitario.

La ubicación del reactor permite captar las aguas del pretratamiento de la planta por gravedad a fin de optimizar el uso de energía, se montó en una plataforma de concreto tipo solera la cual sirve a su vez como lecho de secado únicamente para el reactor en mención, y que cuenta con una tubería de PVC de 3 pulgadas, la cual conduce las aguas lixiviadas hacia el desagüe interno de la planta.

3.2. Afluente del reactor UASB-TS

El afluente del reactor UASB-TS proviene de una caja de distribución ubicada a 50m agua debajo de la salida del pretratamiento. En esta caja se instaló una canastilla artesanal que funciona como un filtro de los sólidos gruesos que pudieron pasar el pretratamiento de la planta. Dentro de esta caja se instaló una electrobomba sumergible a fin de impulsar las aguas hacia la línea de ingreso al reactor. Cabe precisar que el periodo de investigación coincidió con las obras de mejoramiento que se realizan dentro del CITRAR-FIA-UNI, las cuales impidieron el acceso libre por gravedad del agua residual al reactor. Por tal motivo se instaló la electrobomba, la que permitió también tener un control en la uniformidad del caudal de ingreso al permanecer las condiciones de bombeo estables durante las etapas de limpieza, en la siguiente imagen se aprecia el esquema final de funcionamiento del sistema.

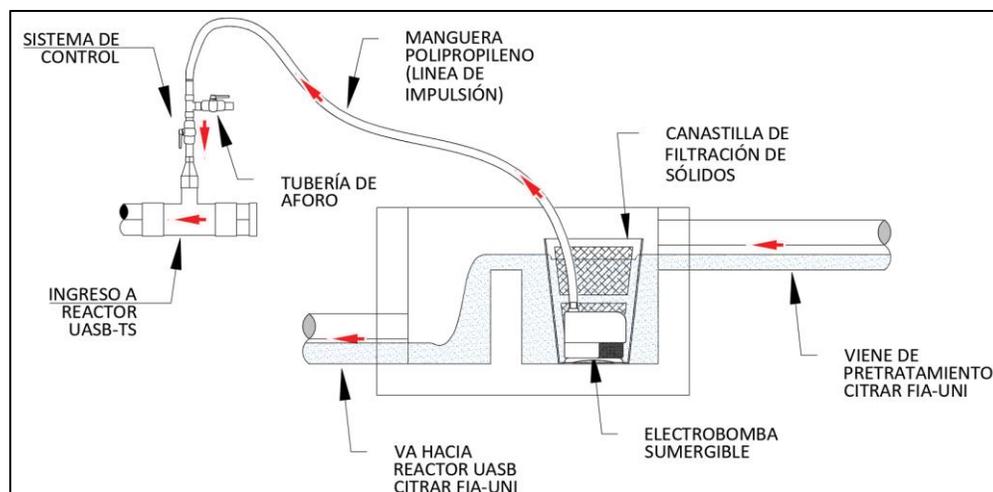


Figura 1. Esquema de captación de reactor UASB-TS

Las características del afluente del reactor fueron obtenidas de investigaciones en paralelo realizadas por las brigadas de investigación de CITRAR-FIA-UNI, las cuales presentan variaciones de acuerdo a la temporada del año, y del mismo modo se ha considerado algunas características obtenidas en otra investigación previa (Yaya Beas, 2015), como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del afluente del reactor UASB-TS.

Parámetro	Unidades	Promedio	n
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg·L ⁻¹	723.2 ± 320.3	90
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg·L ⁻¹	220.5 ± 42.7	28
Sólidos Suspendidos Totales	mg·L ⁻¹	126.5 ± 28.5	36
Aceites y grasas (*)	mg·L ⁻¹	30.8 ± 14.1	36
Fósforo Total-P (*)	mg·L ⁻¹	6.6 ± 2	35
Nitrógeno Kjeldhal total-NKT (*)	mg·L ⁻¹	16.2 ± 6.5	36
Oxígeno Disuelto	mg·L ⁻¹	6.8 ± 0.4	36
Temperatura	°C	22.8 ± 4.1	233
pH	-	7.1 ± 0.3	233
Coliformes Termotolerantes	MPN/100mL	9.67 x 10 ⁸ ± 1.89 x 10 ⁸	36
Huevos de helmintos	huevos·L ⁻¹	2.4 ± 1.4	90

Fuente: Elaboración propia
 (*) Yaya-Beas et al. (2015)

3.3. Reactor UASB-TS

El reactor UASB-TS es una estructura prefabricada de fibra de vidrio, la cual cuenta con una tubería de acceso de PVC de 4" de diámetro que accede por la parte alta central de la estructura, y que a su vez desciende por medio de una tubería del mismo diámetro hasta la parte inferior del reactor por debajo del manto de lodo, cuenta con una zona de digestión en la cual se encuentra un manto de lodos de 0.60m de altura la cual fue inoculada de los reactores UASB aledaños pertenecientes a la planta, a una altura de 1.5m del base de dichos reactores.

La estructura del reactor cuenta también con una zona de sedimentación, la cual se separa de la zona de digestión por medio de una pared tipo campana que a su vez permite acumular los gases que se producen, en un solo punto dentro de la estructura; el agua "tratada" posteriormente es evacuada por la parte alta de la zona de sedimentación por medio de una tubería de PVC de 4" de diámetro, desde la cual se procedió a la toma de muestras.

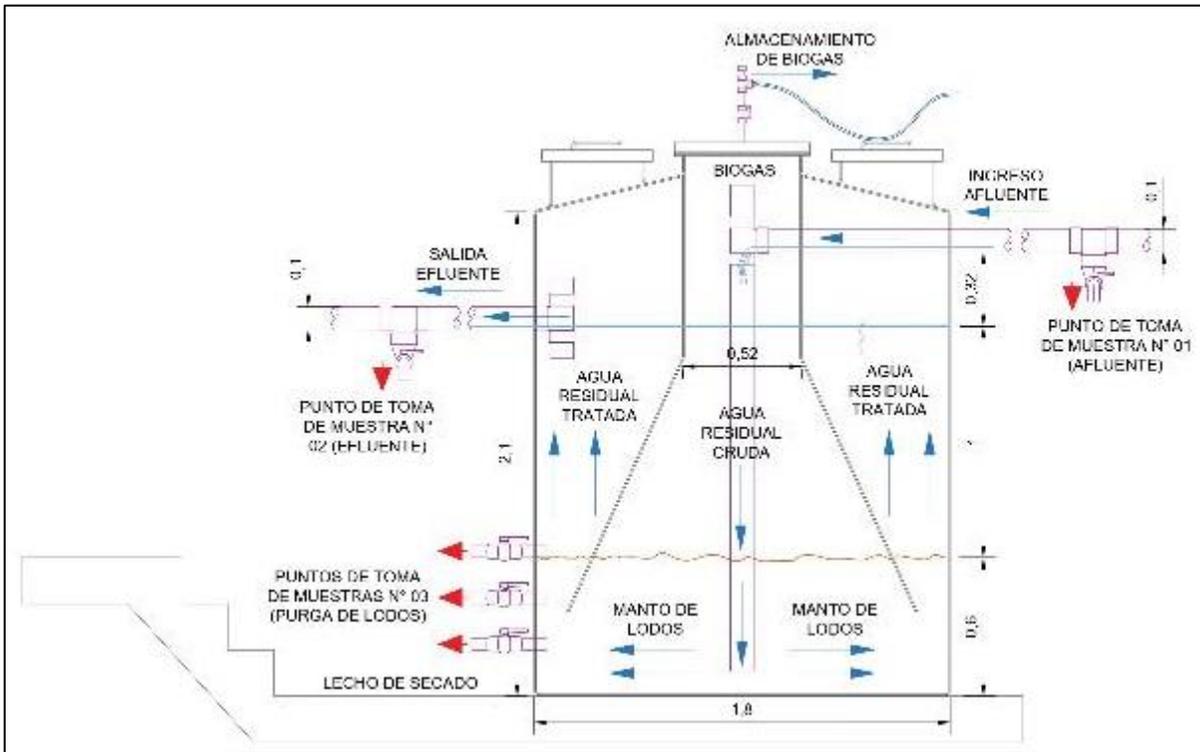


Figura 2. Esquema de funcionamiento del reactor UASB-TS

3.4. Etapas de la investigación.

3.4.1. Acondicionamiento del área de estudio

El reactor UASB-TS fue instalado en el año 2016 para una investigación previa, motivo por el cual para la investigación actual ya se contaba con el reactor instalado en el lugar mencionado, pero fuera de operación.

Para la puesta en operación del reactor se procedió a la instalación de una manguera provisional que sirvió de línea de impulsión de DN ½", en la cual fue instalada una bomba sumergible cuyo caudal tope fue de 0.20l/s; y a fin de impedir el deterioro precoz de la bomba se adaptó un filtro de sólidos dentro del cual se colocó la bomba que operaba las 24 h del día. Adicionalmente se limpió y acondicionaron las zonas del lecho de secado y la zona de almacenamiento de gases a fin de asegurar la hermeticidad de esta última.

3.4.2. Inoculación de lodo anaerobio

A fin de incrementar la eficiencia del reactor a lo largo del proceso de investigación se ha considerado la inoculación de un manto de lodos de 0.60m el cual fue introducido al inicio de la etapa de arranque y cuyo tiempo de adecuación fue 4 meses aproximadamente.

El lodo inoculado corresponde al lodo anaerobio extraído del reactor RAMLFA de la planta del CITRAR-FIA-UNI, a una altura de 1.5m desde la base, el volumen total de lodo dentro del reactor es de 1.5 m³.

Teniendo en cuenta los antecedentes se ha considerado un caudal de operación de 0.10l/s de agua residual, el cual ingresará de manera constante al reactor y que genera un tiempo de retención hidráulica teórico de 11h y 6min durante toda la etapa de arranque.

3.4.3. Adaptación del sistema de captación de biogás

Para la captación y almacenamiento del biogás se ha considerado la instalación de un sistema compuesto por mangueras de 8mm de PVC flexibles transparentes, los cuales fueron adaptados a una tuberías de DN ½" con un niple de cromo para gas, instalado en la parte superior del tanque, al cual se le colocó una tapa con refuerzos de jebe y con abrazaderas metálicas a presión para asegurar la hermeticidad del sistema; estas mangueras de 8mm son conectadas a unas bolsas de aluminio herméticas los cuales cuentan con válvulas de gas de PVC dobles, para permitir la apertura y cerrado del sistema y el retiro de las bolsas sin alterar la hermeticidad del sistema.

Para la cuantificación del biogás producido según el método volumétrico dentro del reactor UASB-TS se ha considerado la fabricación artesanal de un recipiente hermético, similar a lo indicado en la Figura 3 el cual se llenó de hidróxido de sodio (NaOH), por el cual se hizo un lavado del biogás que se capta dentro del tanque UASB-TS, con el cual se contabilizó el volumen de producción de metano (CH₄) que se produce diariamente en el reactor.

El procedimiento de medición del Frasco de Marriot es por desplazamiento, se conectan las bolsas de gas retiradas del tanque a mangueras instaladas en el balde y por presión se empieza a empujar el gas desde la bolsa y esta desplaza el volumen de hidróxido de sodio (NaOH) equivalente al volumen de metano (CH₄) de la muestra, ya que consume el dióxido de carbono que es el segundo mayor componente del biogás.

A continuación se muestra un esquema del sistema implementado para la medición de este componente.

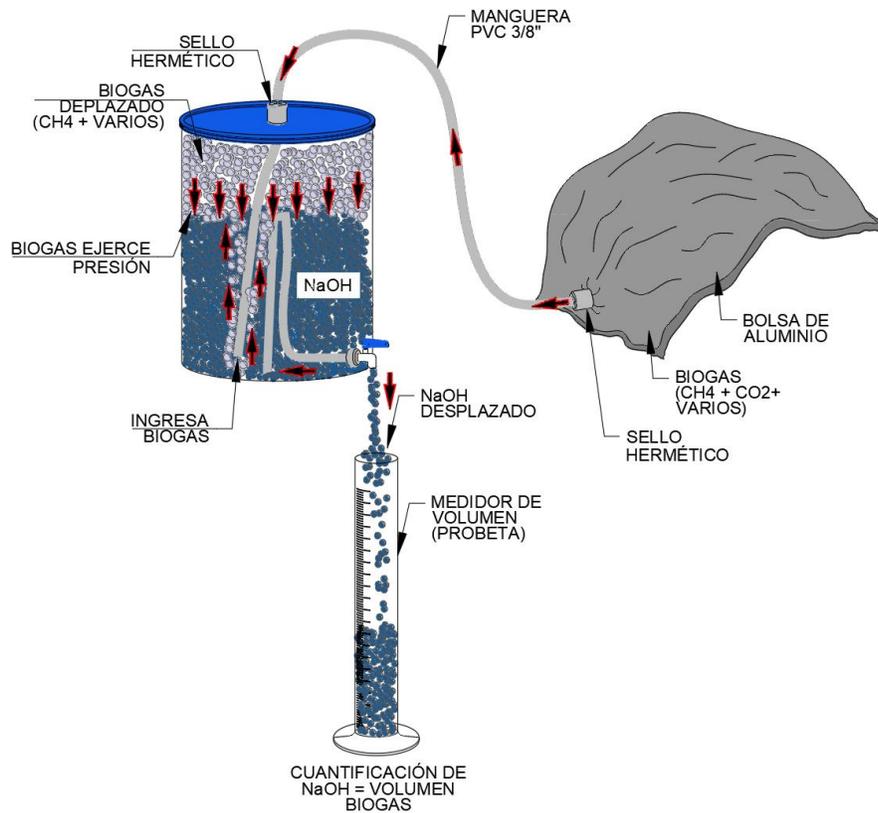


Figura 3. Esquema de cuantificación del biogás

3.5. Parámetros evaluados y puntos de monitoreo

Estos se han seleccionado a fin de determinar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y la fracción de materia orgánica en lodos, los parámetros evaluados se muestran en la Tabla 4. Los puntos de monitoreo seleccionados fueron el afluente (denominado Aflu) y el efluente del reactor (denominado Eflu).

3.6. Frecuencia y cronogramas de monitoreo

3.6.1. Frecuencia de monitoreo

Se muestra a continuación en la Tabla 4 la relación de los parámetros que fueron medidos, el punto de muestreo de cada parámetro y la frecuencia de medición de cada uno de ellos:

Tabla 4. Frecuencia de monitoreo de parámetros

Parámetro	Punto de muestreo	Frecuencia
Turbiedad	Aflu/Eflu	Diaria (*)
pH	Aflu/Eflu	Diaria (*)
Temperatura	Aflu/Eflu	Diaria (*)
Oxígeno disuelto	Aflu/Eflu	Diaria (*)
Temperatura ambiental	Ambiente	Diaria (*)
Humedad relativa del ambiente (%HR)	Ambiente	Diaria (*)
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Aflu/Eflu	Semanal
Producción de metano (CH ₄)	Reactor	Diaria (2 por semana)
Sólidos totales, fijos y volátiles	Aflu/Eflu/lodos	Semanal
Sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles	Aflu/Eflu	Semanal
Sólidos disueltos totales, fijos y volátiles	Aflu/Eflu	Semanal

Fuente: Elaboración propia

Leyenda:

(*) Las pruebas realizadas se hicieron 2 veces por día, la primera promediando las 9:00:00 y la segunda promediando las 17:00:00 horas.

Aflu: Afluente del reactor UASB-TS

Eflu: Efluente del reactor UASB-TS

3.6.2. Cronograma de monitoreo

La etapa de monitoreo duró en total de 28 semanas, las primeras 8 semanas son consideradas de arranque, las 12 siguientes para la etapa I, y las 8 finales para la etapa II; en todas las 28 semanas indicadas se midieron todos los parámetros indicados en la Tabla 4, pero se debe tomar en cuenta que en el caso de los parámetros diarios, se han considerado 11 semanas anteriores a estas 28, por lo cual se cuenta en total con 39 semanas, en la Tabla 5 se observan las fechas de inicio y fin y la duración de cada una de las etapas, así como también los parámetros que fueron medidos en cada una de ellas.

Tabla 5. Etapas de monitoreo de la investigación

Etapas de monitoreo	Fecha inicial	Fecha fin	Duración		Parámetros medidos
Etapa de arranque	29/07/2019	20/09/2019	39 días	8 semanas	Todos
Etapa I	23/09/2019	27/12/2019	70 días	12 semanas	Todos
Etapa II	30/12/2019	28/02/2020	44 días	8 semanas	Todos

Fuente: Elaboración propia

El caudal de operación de las diferentes etapas se aprecia en la Tabla 6. Estos caudales fueron tomados teniendo en cuenta los usados en una investigación previa desarrollada (Yaya, 2017), con el fin de observar la variación de resultados en cuanto se presente una alternancia en las condiciones operativas del sistema, ya sea a favor o en contra.

Tabla 6. Condiciones de operación por etapas

Etapas de monitoreo	Caudal afluyente (Qaf) (l/s)	Tiempo de retención Hidráulico teórico (TRHt)	Velocidad de Ascenso (m/d)
Etapa de arranque	0.10	11' 06"	5.84
Etapa I			
Etapa II	0.05	22' 12"	11.68

Fuente: Elaboración propia

3.7. Procedimiento de monitoreos

Los procedimientos de monitoreo utilizados para en la investigación para la caracterización, tanto fisicoquímica como microbiológica han sido tomando en cuenta la indicado en los de los Métodos para el análisis de aguas y aguas residuales de la American Public Health Association (2017), y haciendo uso de equipos tecnológicos de apoyo en ciertos casos, los cuales acortan los tiempos de medición y permiten tener una nube mayor de datos con menor inversión de tiempo.

Tabla 7. Resumen de procedimientos de monitoreo

Parámetro	Metodología Aplicada	Lugar de Análisis
Turbiedad	American Public Health Association (2017)	LAB. CITRAR-FIA UNI
pH		
Temperatura		
Oxígeno disuelto		
Temperatura ambiental	American Public Health Association (2017)	IN SITU
Humedad relativa del ambiente		
Demanda bioquímica de oxígeno	American Public Health	LAB. FIA UNI
Producción de metano		

Parámetro	Metodología Aplicada	Lugar de Análisis
Sólidos totales, sólidos totales fijos y sólidos totales volátiles Sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles Sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles	Association (2017)	

Fuente: Elaboración propia

3.7.1. Turbiedad

Para la medición de este parámetro se empleó el turbidímetro digital marca HACH ubicado en el laboratorio de CITRAR-FIA-UNI.

3.7.2. pH

Para la medición de este parámetro se hizo uso de 2 equipos, un ph-metro marca Hanna portable y el equipo digital de la marca HACH ubicado en el laboratorio de CITRAR UNI, para este caso se hizo un comparativo de las mediciones durante la etapa de arranque a fin de determinar la eficiencia en la medición del parámetro, probándolo con las soluciones buffer y teniendo que la mayor precisión era del equipo portable Hanna, considerando este para el resto de la investigación.

3.7.3. Oxígeno disuelto y temperatura del agua residual

Para la medición de este parámetro se empleó el equipo digital de la marca HACH ubicado en el laboratorio de CITRAR-FIA-UNI, el cual también proporciona la temperatura de la muestra.

3.7.4. Temperatura ambiente y humedad relativa

Para la medición de estos parámetros se empleó el equipo digital de la marca HTC-2 el cual se ubicó en la zona del reactor, adyacente a esta para tener los resultados más adecuados.

3.7.5. Producción de metano

La determinación de la producción de metano se hizo tomando en cuenta el cronograma que se observa en la Tabla 8, considerando que la medición se hizo 2 veces por semana para un tiempo de producción y almacenamiento de 24h:

Tabla 8. Procedimiento de medición de Biogas

DÍA	Actividad Desarrollada
Lunes	Agitación de la capa de lodo y cierre hermético del reactor para saturación del medio
Martes	Inicio de almacenaje 01
Miércoles	Fin de almacenaje 01 seguido de agitación de la capa de lodo y cierre hermético para saturación del medio
Jueves	Inicio de almacenaje 02
Viernes	Fin de almacenaje 02 y medición de bolsas de aluminio

Fuente: Elaboración propia.

Nota: los intervalos entre acciones son de 24hr y fueron realizados al iniciar la jornada diaria, al promediar las 9:00:00 horas

De esta manera y tomando en cuenta lo indicado en la Tabla 8 se obtuvieron 2 valores semanales, los cuales se midieron siguiente el procedimiento descrito a continuación:

- **Principio del método**

Para la medición de metano (CH₄) se ha considerado la eliminación del dióxido de carbono. Para dicha eliminación se ha utilizado hidróxido de sodio tomando en cuenta la siguiente fórmula:



De esta forma se asegura la neutralización del CO₂ y no se cuantifica en el procedimiento. Este procedimiento ha sido previamente utilizado por (Torres & Pérez, 2010).

A continuación, se mencionan los materiales y procedimientos empleados.

- **Equipos y materiales**

1. Bolsas de plástico con forro de aluminio, vacíos herméticos.
2. Balde de plástico con hidróxido de sodio hermético (Balde Marriot).
3. Jeringa y manguera de succión.
4. Probeta de 1L.

- **Procedimiento**

1. Se desconectan las bolsas de aluminio de cierre hermético con válvulas de gas, y se trasladan a la zona de lavado del biogás.
2. Se conectan las bolsas una por un recipiente hermético de fabricación artesanal, que contiene el Hidróxido de sodio NaOH.
3. Se coloca un sistema de almacenamiento calibrado en la parte inferior para contener el agua que se evacue.
4. Se empuja el gas aplastando manualmente la bolsa hacia el balde Marriot que contiene el hidróxido de sodio, con el fin de que este consuma el CO_2 presente en el gas y el volumen desplazado sea mayormente el metano (CH_4).
5. Se contabiliza el volumen total de hidróxido de sodio desplazado del balde, el mismo que es el volumen de metano (CH_4) presente en la bolsa de aluminio.

3.7.6. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

El procedimiento seguido se basa en lo indicado en los “Métodos estándar para la evaluación de agua y aguas residuales” 23.^a edición de la American Public Health Association, y tomando en cuenta también las simplificaciones indicadas en el Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medioambiente de Uruguay.

- **Cálculo y expresión de resultados.**

El cálculo se hizo tomando en cuenta el método gráfico y que es de mayor precisión para muestras con contenido de materia orgánica moderada a alta.

$$DBO_5, \text{ mg/L} = - K \times V - Y + ODm$$

Donde:

K = pendiente de la recta

V = capacidad del frasco winkler (300mL)

Y = intercepción de la recta con el eje de las y.

ODm = concentración de oxígeno disuelto en la muestra original.

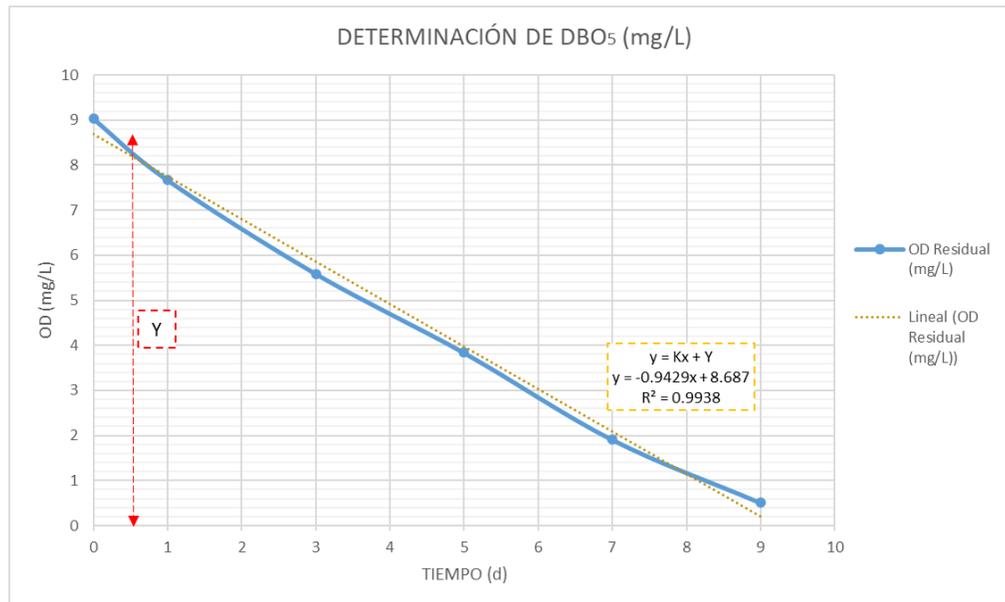


Figura 4. Gráfico de determinación de DBO₅

3.7.7. Sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles en el agua residual

El procedimiento seguido para la determinación de sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles presentes en el agua residual se basó en lo indicado en

los “Métodos estándar para la evaluación de agua y aguas residuales” 23.^a edición de la American Public Health Association, como indica en el capítulo 2540 para el cálculo de los sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos.

3.7.8. Sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles del lodo

El procedimiento seguido para la determinación de sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles en el agua residual, se basa en lo indicado en los “Métodos estándar para la evaluación de agua y aguas residuales” 23va edición de la American Public Health Association, como indica en el capítulo 2540 subíndice G para cálculo de sólidos totales, fijos y volátiles para sólidos y semisólidos (materia acuosa).

Determinación de sólidos fijos totales (SFT) y volátiles totales (SVT).

El procedimiento a continuación descrito permite la determinación de los sólidos fijos totales (SFT) presentes en la muestra de lodo, los sólidos volátiles totales (SVT) se determinan por la diferencia entre los sólidos totales (ST) y los SFT.

1. Se toma la muestra tal como terminó en la prueba anterior y se coloca dentro de una mufla a 550°C (Es recomendable colocarlo debajo de una campana extractora de gases y utilizar el equipo adecuado de protección respiratoria)
1. Se retira la muestra y se coloca en el desecador, al enfriar la muestra se procede a pesar.
2. Una vez pesada la muestra se procede a realizar nuevamente los pasos 1 y 2 repetidamente hasta asegurar que la variación de pesos entre pruebas no sea mayor de 4% o 50mg, es en ese momento que se considera que se ha obtenido el peso constante que es el valor que se utilizará para la prueba (Pk)

- **Cálculo y expresión de resultados.**

$$SFT (mg) = \frac{(Pk2 - Pk) \times 1000}{P \text{ muestra}}$$

$$SVT = ST - SFT$$

Donde:

SFT = Sólidos Fijos Totales

SVT = Sólidos Volátiles Totales

ST = Sólidos Totales

Pk2 = Peso constante del plato + muestra después de la ignición.

Pk = Peso constante del plato + muestra antes de la ignición.

P muestra = Peso de muestra ($30 \pm 0.01g$).

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1. Resultados de la investigación

A continuación, se indican los resultados que se fueron obteniendo durante el proceso de monitoreo,

Los resultados a detalle se muestran en el capítulo X; a continuación, se indicarán los resultados con promedios semanales, obtenidos desde la etapa de arranque.

Tabla 9. Resumen de valores máximo mínimos y promedios de parámetros analizados

Parámetro	Resultado	Etapas y Concentración								
		Arranque			Etapa i			Etapa ii		
		Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Turbiedad (unt)	Afluente	247.9 ± 97.2	611	112	197.3 ± 51.0	365	97.3	221.9 ± 86.3	515	97.7
	Efluente	126.9 ± 48.3	252	48.4	96 ± 22.7	163	56.9	57.5 ± 15.2	119	38.4
	Eficiencia (%)	45.90	77.70	10.43	48.4 ± 17.5	75.52	0.00	72.0 ± 7.6	87.07	56.50
	Ph	7.6 ± 0.3	8.44	7.17	7.6 ± 0.3	8.40	7.07	7.8 ± 0.2	8.22	6.91
Temperatura (°c)	Afluente	7.0 ± 0.48	20.10	17.20	22.34 ± 2.35	26.40	18.10	27.09 ± 1.10	29.40	25.20
	Efluente	18.18 ± 0.61	19.40	17.20	22.23 ± 2.32	26.20	18.10	26.84 ± 1.14	29.30	24.60
	T° amb	18.56 ± 1.51	22.70	16.50	23.66 ± 3.46	31.20	16.00	30.41 ± 2.14	33.7	25.80
	H.r.	78 ± 7.50	89.00	61.00	64.02 ± 12.14	90.00	45.00	55.88 ± 7.75	77.00	45.00
O.d. (mg/l)	Afluente	1.27 ± 1.71	5.57	0.06	0.52 ± 1.93	4.69	0.07	0.22 ± 1.46	1.27	0.07
	Efluente	0.35 ± 0.31	1.29	0.07	0.28 ± 0.42	1.17	0.08	0.14 ± 0.39	0.20	0.07
DBO (mg/l)	Afluente	233.53 ± 51.17	278.85	130.05	208.81 ± 19.06	255.96	173.18	220.44 ± 13.53	239.52	194.03

Parámetro	Etapas y Concentración									
	Resultado	Arranque			Etapa i			Etapa ii		
		Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio	Valor máximo	Valor mínimo
	148.54									
	±			135.96 ±			106.01 ±			
Efluente	21.47	176.61	112.15	12.07	157.58	117.26	23.73	140.63	75.54	
	33.97									
Eficiencia (%)	±			34.45 ±			52.06 ±			
	12.27	53.69	13.76	7.45	46.67	22.17	9.44	65.32	38.95	

FUENTE: Elaboración propia

4.1.1. Turbiedad.

Los resultados de la evolución de las eficiencias promedio semanales de remoción de Turbiedad en el reactor UASB-TS se muestran en el Gráfico 1. En dicho gráfico se presenta la disminución de la turbiedad en el efluente a lo largo de todas las etapas de la investigación, pudiéndose observar una clara diferencia entre etapas, lo cual se acentúa en los promedios por etapa indicados en la Tabla 10, donde se observa el promedio de remoción de 45.9%, 48.4% y 72% para las etapas de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

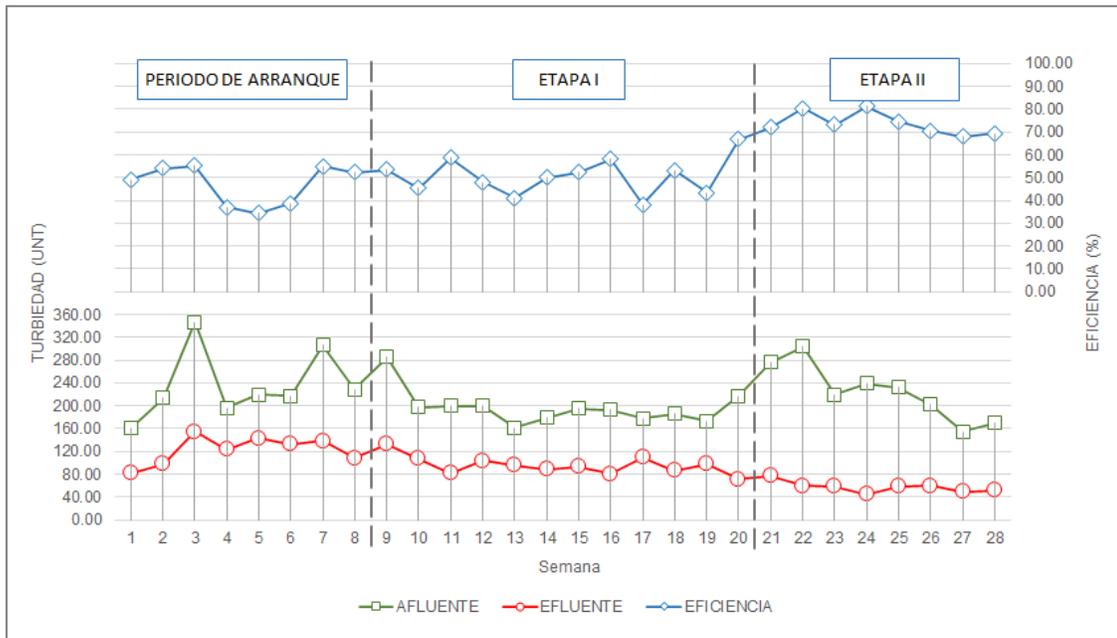


Gráfico 1. Eficiencia de remoción de turbiedad del reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. pH

La variación del pH en promedios semanales se muestra en el Gráfico 2. En dicho gráfico se aprecian rangos de valores no muy diferidos, y al obtener condiciones más ácidas en el efluente se acentúa en esta la capacidad buffer del sistema. En la Tabla 10 se puede observar un rango relativamente constante del pH en las tres etapas.

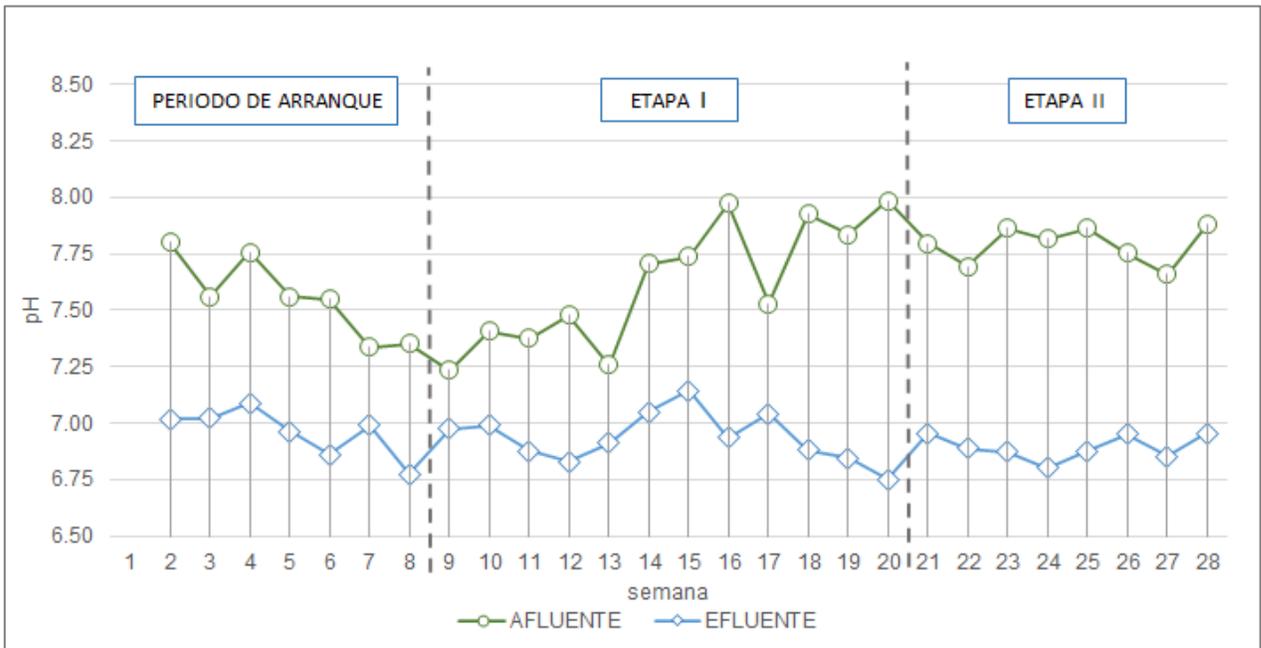


Gráfico 2. Variación de pH en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Temperatura

En el Gráfico 3 se observa la variación de temperaturas, en dicho gráfico se aprecia una clara alza, desde la etapa de arranque que comenzó a fines de la estación de otoño e inicios de invierno, y la culminación que coincidió con el fin de la estación de verano, en cuyas etapas se obtuvieron los valores indicados en la Tabla 10.

Del mismo modo se indica en el Gráfico 3 la comparativa de las temperaturas del agua residual, en el afluente, efluente y la temperatura ambiental, comparada con la humedad

relativa, la cual a diferencia de las anteriores que van en alza, se encuentra en descenso con respecto al tiempo.

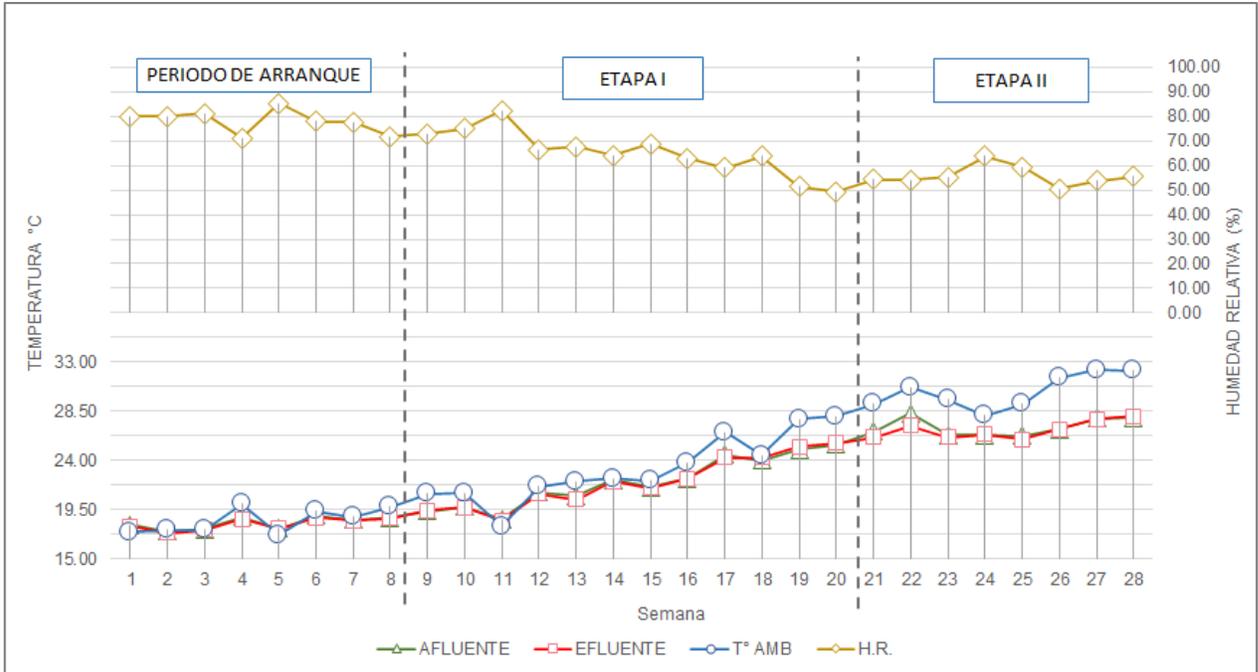


Gráfico 3. Variación de temperatura, T° ambiente y humedad relativa

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto no es un parámetro representativo en un sistema anaerobio, aunque por motivos de investigación se ha considerado su medición; de este modo, se aprecia los valores promedios de concentración por etapas en la Tabla 10, en los que se entiende que la concentración no superó los 2 mg/L, pero, se han podido registrar días en los que el agua residual ingresó con valores elevados, los cuales no fueron considerados para la evaluación de la investigación por las condiciones anaerobias del mismo del reactor.

4.1.5. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

En el Gráfico 4 se observa la progresión positiva de la eficiencia de remoción de la DBO₅, dicha eficiencia se incrementa a medida que llegan épocas más cálidas y el cual

coincide también cuando también con las variaciones operativas en el sistema (Etapa II). El valor promedio de la concentración en el afluente es de aproximadamente 233.53 ± 51.17 mg/L, 208.81 ± 19.06 mg/L y 220.44 ± 13.53 mg/L para la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente. Por otro lado, la concentración en el efluente tiene su mayor valor promedio en la etapa de arranque y la menor concentración promedio en la etapa II, siendo estas respectivamente; 148.54 ± 21.47 y 106.01 ± 23.73 mg/L, como se muestra en la Tabla 10.

Asimismo, se indica que la mejor eficiencia en la remoción de la DBO se encuentra en la etapa II, la cual presenta valores de hasta 65.32% y cuyo promedio de toda la etapa es de 52.06 ± 9.44 %, tal como se indica en la Tabla 10.

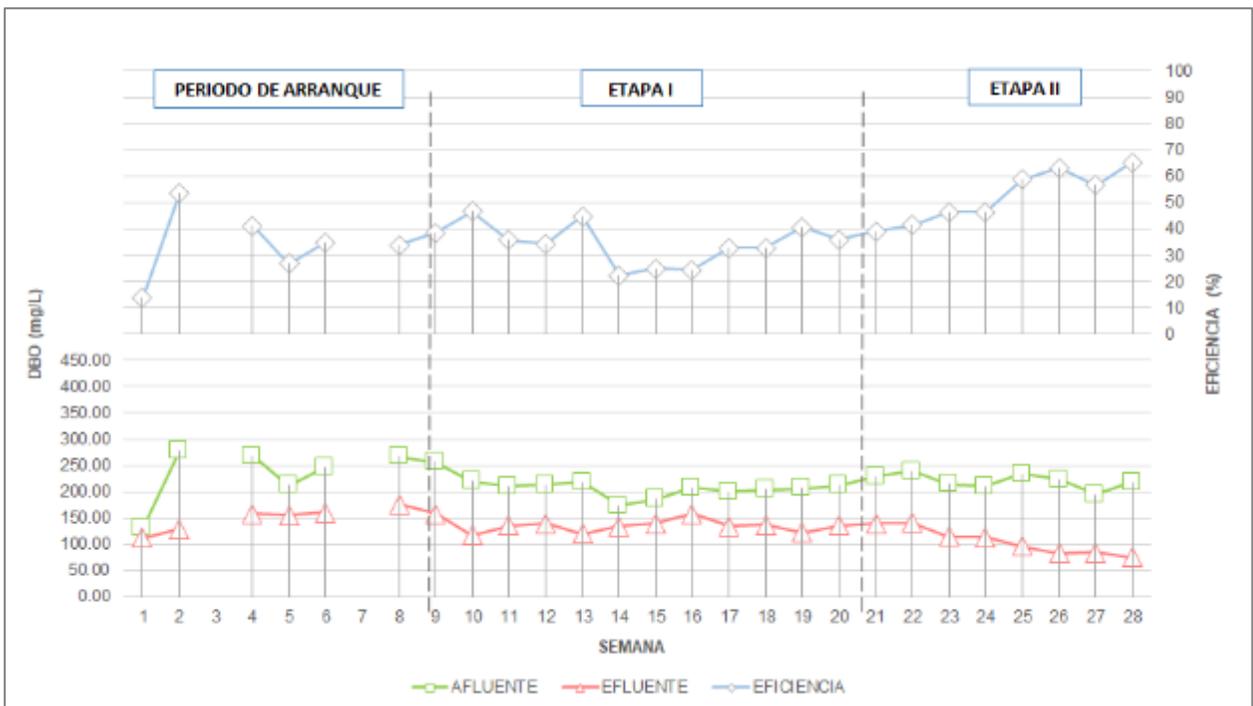


Gráfico 4. Evolución de remoción de DBO en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

4.1.6. Sólidos en agua residual

Los siguientes capítulos comprenden los ensayos hechos a las aguas residuales tanto del afluente como del efluente; se muestran los resultados en su totalidad en el capítulo X.

4.1.6.1. Sólidos totales, sólidos fijos totales y sólidos volátiles totales

Se muestra en el Gráfico 5 la evolución de la eficiencia en la remoción de los ST presentes en el agua residual, los cuales según se aprecia presentan un ligero incremento de la eficiencia pero no tan marcada presentando mucha variación a lo largo de las tres etapas de la investigación, teniendo valores mínimos de 6.83% y máximos de 44.76%, los cuales corresponden a la etapa de arranque y la etapa II respectivamente; del mismo modo se aprecia que la eficiencia promedio por etapa es de $26.78 \pm 19.64 \%$, $23.89 \pm 9.423 \%$ y $33.64 \pm 8.866 \%$, para las etapas de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

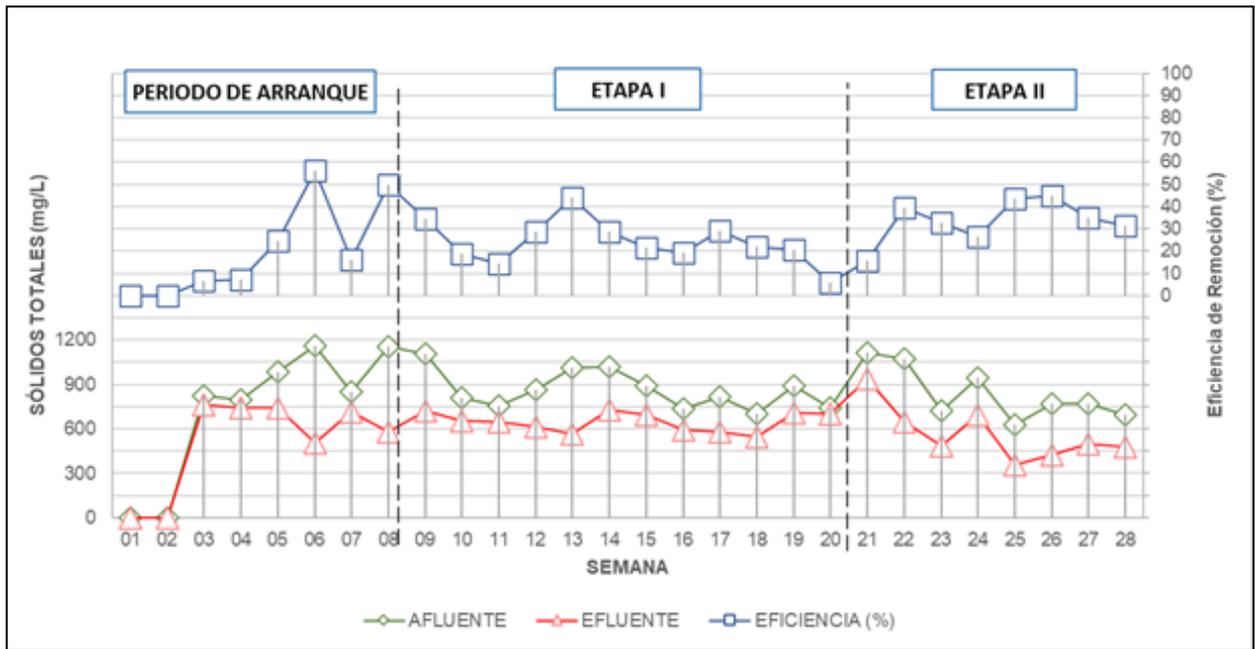


Gráfico 5. Eficiencia en la remoción de sólidos totales en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 6 se indica la evolución de la eficiencia en remoción de sólidos fijos totales. En dicho gráfico se presentan valores relativamente bajos en la etapa I, y medianos en la etapa II, los cuales tienen una dispersión muy grande con valores que van desde 0.94% hasta 85.17%. Similarmente en el Gráfico 7 se indica la eficiencia en la remoción de sólidos volátiles totales, siendo este un complemento de los sólidos anteriormente mencionados, y

cuyos resultados al igual que el caso anterior presentan una gran dispersión con valores que van desde 1.60% hasta 67.74% similares a los encontrados en el caso anterior.

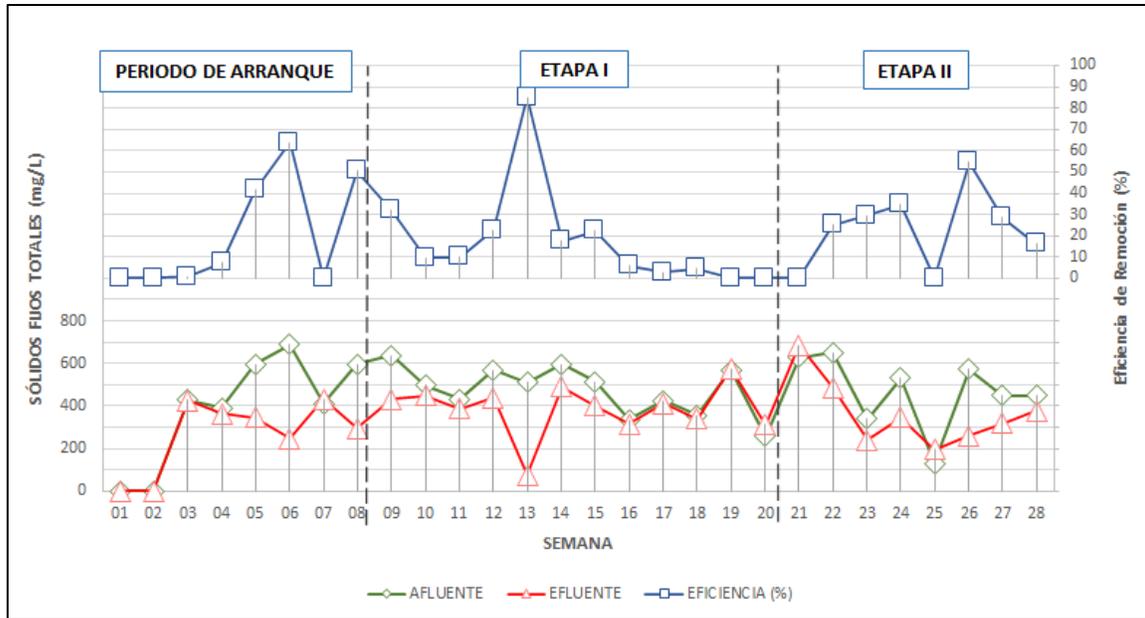


Gráfico 6. Eficiencia en la remoción de sólidos fijos totales en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

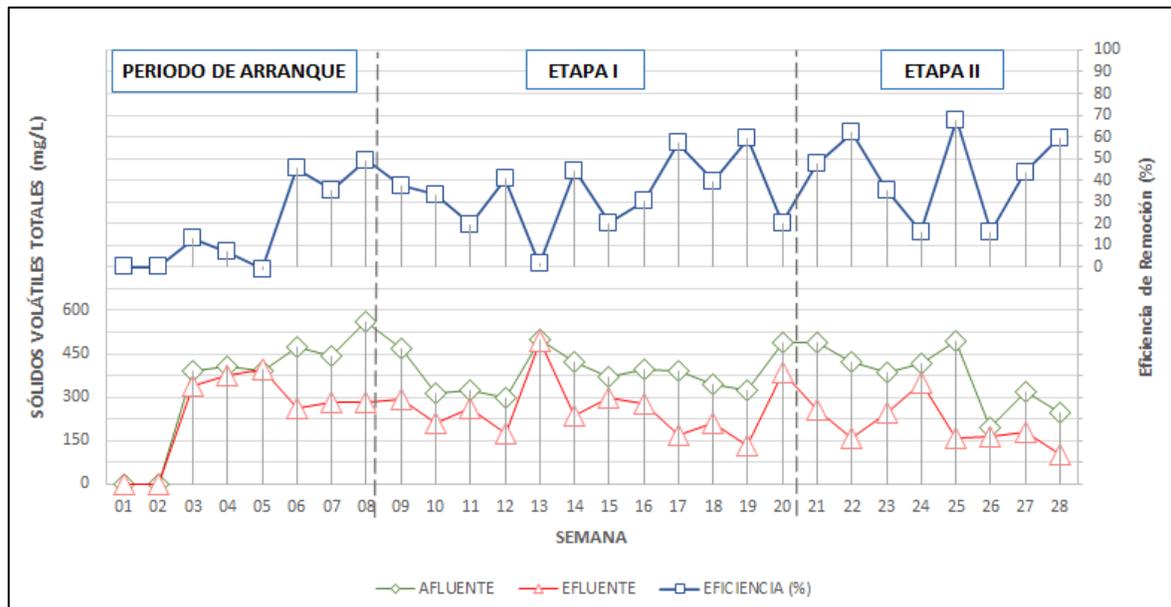


Gráfico 7. Eficiencia en la remoción de sólidos volátiles totales en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Valores promedios, máximos y mínimos de sólidos totales, sólidos fijos totales y sólidos volátiles totales.

VALOR	SÓLIDOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS FIJOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (mg/L)		
	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
ETAPA DE ARRANQUE									
PROMEDIO	962.7 ± 152.2	675.3 ± 96.2	26.78 ± 19.64	518.7 ± 112.8	352 ± 65.4	32.8 ± 24.61	444 ± 59.9	323.3 ± 50.7	24.88 ± 19.39
VALOR MAX	1164.0	764.0	56.4	688.0	432.0	64.0	560.0	396.0	49.3
VALOR MIN	796.0	508.0	6.8	392.0	248.0	0.9	392.0	260.0	6.9
ETAPA I									
PROMEDIO	861.3 ± 122.8	647 ± 61.9	23.89 ± 9.423	474.7 ± 110.8	386 ± 117.5	21.28 ± 23.09	386.7 ± 67.7	261 ± 96	33.96 ± 15.81
VALOR MAX	1104.0	728.0	43.9	636.0	576.0	85.2	500.0	492.0	59.3
VALOR MIN	700.0	548.0	5.9	256.0	76.0	2.8	296.0	132.0	1.6
ETAPA II									
PROMEDIO	840 ± 170	566 ± 175.5	33.64 ± 8.866	469 ± 159.9	364 ± 147.7	31.39 ± 11.77	371 ± 101.4	202 ± 72.6	43.59 ± 18.53
VALOR MAX	1116.0	940.0	44.8	652.0	684.0	54.5	496.0	348.0	67.7
VALOR MIN	628.0	356.0	15.8	132.0	196.0	16.1	196.0	100.0	16.3

FUENTE: Elaboración propia

4.1.6.2. Sólidos suspendidos totales, suspendidos fijos y suspendidos volátiles

En el Gráfico 8 se indica la evolución de la eficiencia en la remoción de los SSV. En dicho gráfico se puede observar un marcado ascenso a través de las etapas, teniendo los valores mínimos de 2.20% en la etapa de arranque, y máximo de 78.89% en la etapa II; asimismo, se aprecian los valores promedio correspondientes a cada etapa, los cuales son: $24.24 \pm 21.17 \%$, $49.57 \pm 17.38 \%$ y $72.38 \pm 5.417 \%$ correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

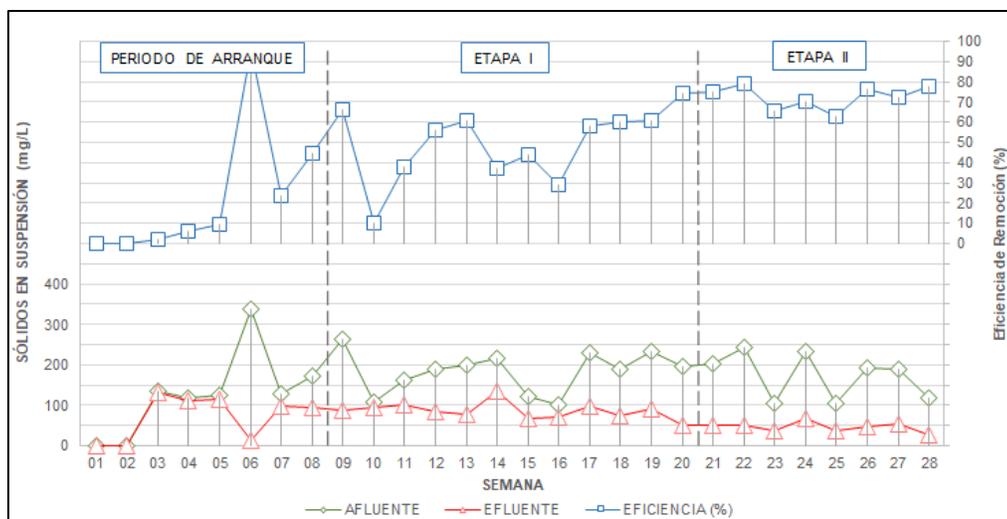


Gráfico 8. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos totales en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

En el **Gráfico 9** se indica la evolución de la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos fijos y en el Gráfico 10 se indica la evolución de la eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos volátiles. En ambos casos se presenta una marcada irregularidad en los resultados, aunque se puede apreciar también el marcado ascenso positivo de la eficiencia promedio desde la etapa de arranque hasta la etapa II.

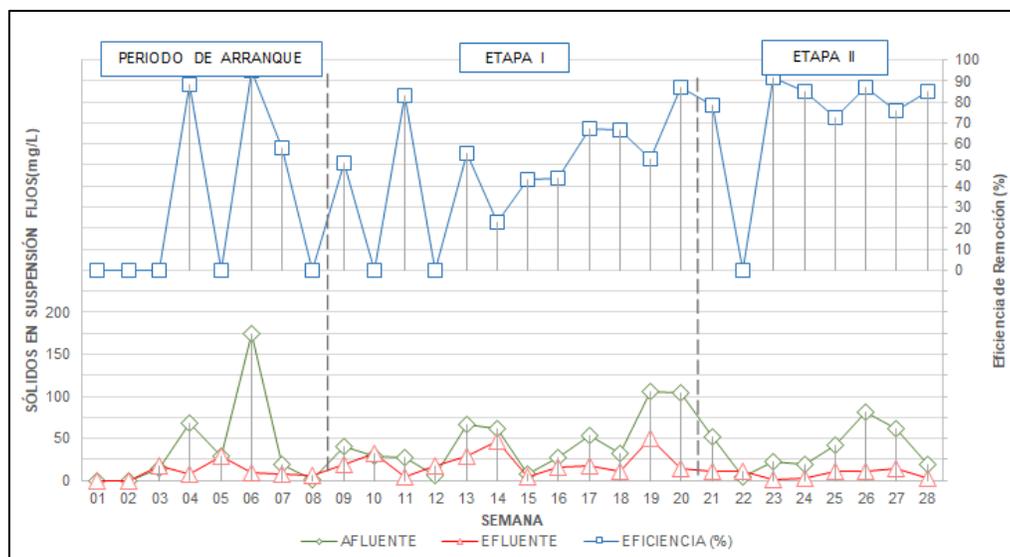


Gráfico 9. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos fijos en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

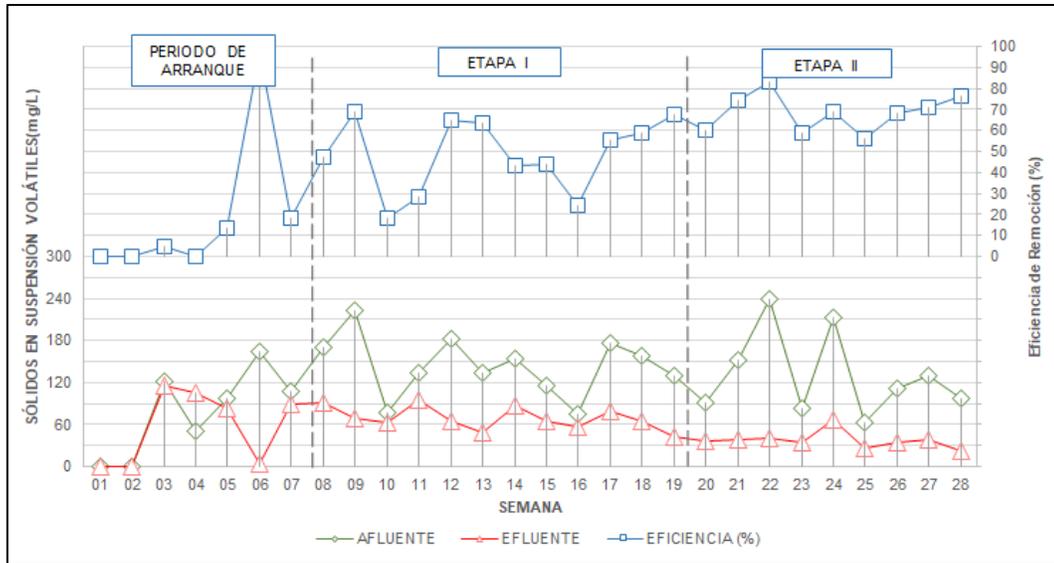


Gráfico 10. Eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Valores promedios, máximos y mínimos de sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles.

VALOR	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS (mg/L)			SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (mg/L)		
	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
ETAPA DE ARRANQUE									
PROMEDIO	170.1 ± 77.5	94.3 ± 38.1	24.24 ± 21.17	51.1 ± 58.8	12.9 ± 8.25	63.90 ± 18.06	119 ± 41	81.4 ± 36.16	31.484 ± 25.68
VALOR MAX	339.00	133.00	95.94	174.00	29.60	94.54	171.00	116.00	97.42
VALOR MIN	120.00	13.75	2.21	2.00	5.60	57.89	51.00	4.25	4.92
ETAPA I									
PROMEDIO	184.6 ± 49.4	86.6 ± 19.9	49.57 ± 17.38	46.7 ± 31.3	21.9 ± 14.3	57.206 ± 18.31	137.9 ± 42.3	64.7 ± 16.6	49.673 ± 17.03
VALOR MAX	263.00	135.20	74.37	105.33	49.60	86.67	222.00	95.20	68.65
VALOR MIN	103.00	50.50	10.28	6.00	4.00	22.62	76.00	36.50	17.95
ETAPA II									
PROMEDIO	174 ± 53	46.5 ± 12.3	72.38 ± 5.417	38.1 ± 24	8.4 ± 4.6	82.114 ± 6.221	136 ± 57.9	38.1 ± 12.1	69.537 ± 8.229

VALOR	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS (mg/L)			SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (mg/L)		
	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
VALOR MAX	244.00	69.50	78.89	81.33	15.00	91.18	238.67	66.50	83.03
VALOR MIN	105.00	26.00	62.86	5.33	2.00	72.62	63.00	23.00	56.35

FUENTE: Elaboración propia

4.1.6.3. Sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles

En el Gráfico 11 se aprecia la evolución de la eficiencia en la remoción de SDT. En dicho gráfico se aprecia cierta homogeneidad en los resultados, con promedio por debajo del 50%, siendo el valor mínimo de 2.5 % y el máximo de 55.09% correspondientes a la etapa II y la etapa de arranque respectivamente; asimismo, los valores promedio por etapas que son, $27.05 \pm 19.45 \%$, $18.74 \pm 9.271 \%$ y $23.53 \pm 10.98 \%$, correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

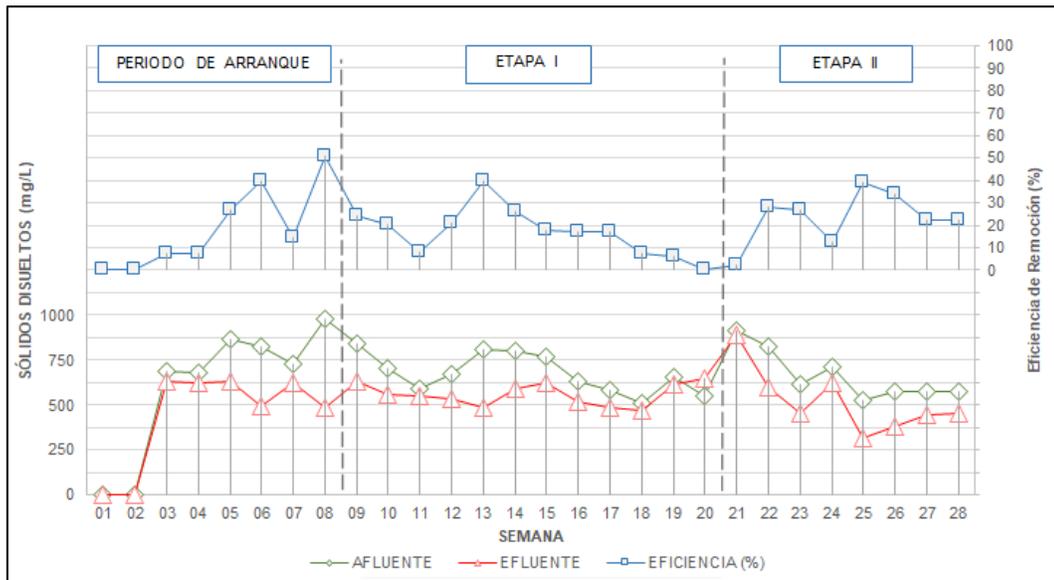


Gráfico 11. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos totales en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 12 se aprecia la evolución de la eficiencia en la remoción de sólidos disueltos fijos y en el Gráfico 13 la evolución de la eficiencia en la remoción de sólidos disueltos volátiles, en los que existe una marcada dispersión de concentraciones, no pudiéndose observar una tendencia en ninguna de ellas.

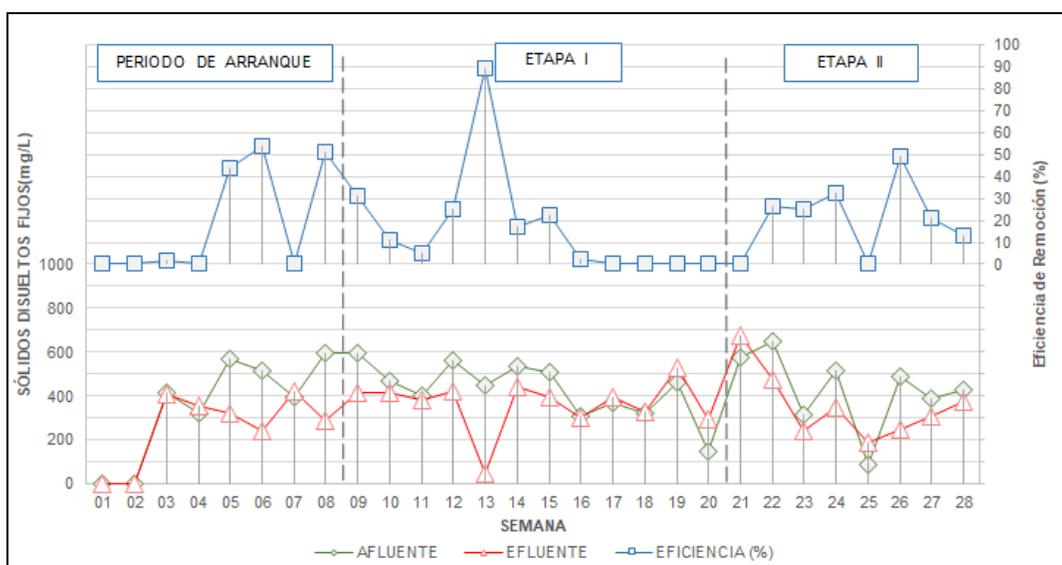


Gráfico 12. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos fijos en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

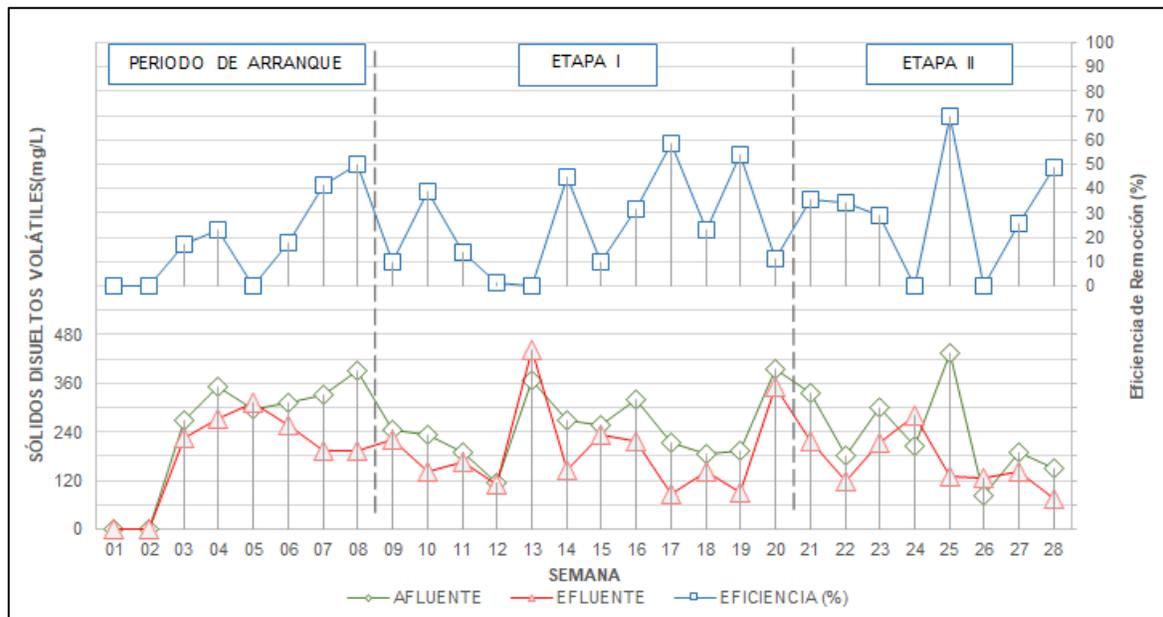


Gráfico 13. Eficiencia en la remoción de sólidos disueltos volátiles en el reactor UASB-TS

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Valores promedio, máximos y mínimos de sólidos disueltos totales, sólidos disueltos fijos y sólidos disueltos volátiles.

VALOR	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS DISUELTOS FIJOS (mg/L)			SÓLIDOS DISUELTOS VOLÁTILES (mg/L)		
	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
ETAPA DE ARRANQUE									
PROMEDIO	792.6 ± 109.6	581 ± 65.1	27.05 ± 19.45	467.5 ± 97.8	339 ± 64.58	41.72 ± 25.04	325 ± 38.8	241.9 ± 42.4	32.35 ± 12
VALOR MAX	983.0	631.0	50.8	594.0	424.0	53.6	389.0	312.0	50.2
VALOR MIN	676.0	484.0	7.2	323.0	238.5	1.7	270.0	193.6	17.0
ETAPA I									
PROMEDIO	676.7 ± 105	560.4 ± 60.2	18.74 ± 9.271	427.9 ± 119.9	364.1 ± 113.2	25.38 ± 25.89	248.8 ± 77	196.3 ± 102.6	26.97 ± 18.82
VALOR MAX	841.0	649.5	39.7	595.0	526.4	89.5	396.0	442.7	58.6
VALOR MIN	509.3	472.0	6.3	151.0	46.7	2.7	113.0	88.8	1.6
ETAPA II									
PROMEDIO	666 ± 130.3	519.5 ± 169.4	23.53 ± 10.98	430.9 ± 161.6	355.6 ± 146.9	27.83 ± 11.24	235 ± 105.9	163.9 ± 62.6	40.38 ± 14.85
VALOR MAX	912	889	39	647	673	49	433	281	69
VALOR MIN	523	317	3	90	184	13	84	77	0

FUENTE: Elaboración propia

4.1.7. Sólidos en lodos y fracción de materia orgánica

En la Tabla 13 se aprecian las concentraciones, tanto de sólidos fijos totales (SF), sólidos volátiles totales (SV) y sólidos totales (ST), con una marcada homogeneidad y que adicionalmente se puede apreciar en las tendencias de el Gráfico 14.

En el caso de los sólidos totales se tiene valores promedios por etapas de 123.83 ± 20.68 mg/Kg, 131.87 ± 14.76 mg/Kg y 125.49 ± 15.75 mg/Kg correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

En el caso de los sólidos fijos totales se tiene valores promedios por etapas de 54.96 ± 6.43 mg/Kg, 64.57 ± 6.34 mg/Kg y 64.62 ± 6.82 mg/Kg correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

En el caso de los sólidos volátiles totales se tiene valores promedios por etapas de 68.87 ± 20.84 mg/Kg, 50.79 ± 3.92 mg/Kg y 48.17 ± 4.49 mg/Kg correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente.

Se aprecia adicionalmente en el Gráfico 14 la evolución del valor de la fracción de materia orgánica (SV/ST) del lodo en el reactor anaerobio. En dicho gráfico se observa una marcada homogeneidad, teniendo variaciones leves de pendiente a lo largo de toda la etapa; como se aprecia en la Tabla 13 los valores rodean el 50%, y como se aprecia en la Tabla 14 la fracción orgánica promedio por etapas es de $54.61 \pm 7.37\%$, $50.79 \pm 3.92\%$ y $48.17 \pm 4.49\%$ correspondientes a la etapa de arranque, etapa I y etapa II respectivamente, teniendo como valor máximo 67.33% y como valor mínimo 39.56% que corresponden a la etapa de arranque y a la etapa II respectivamente.

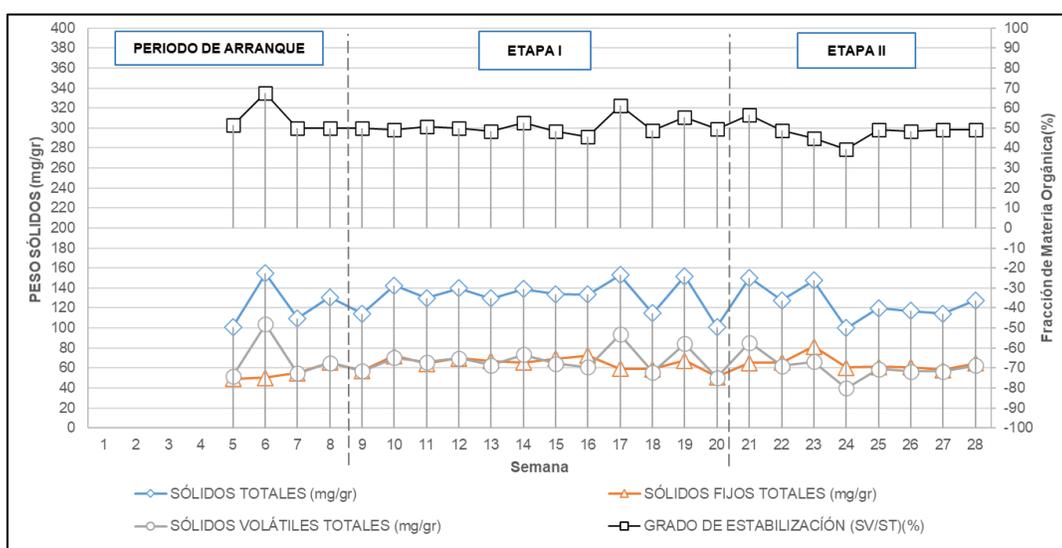


Gráfico 14. Sólidos presentes en los lodos del reactor UASB-TS y Fracción Orgánica (SVT/ST)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Sólidos en lodos anaerobios presentes en el reactor UASB-TS

PRUEBA DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DEL LODO ANAEROBIO EN EL REACTOR UASB-TS					
SEMANA	ETAPA	SÓLIDOS TOTALES (mg/g)	SÓLIDOS FIJOS TOTALES (mg/g)	SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (mg/g)	FRACCIÓN ORGÁNICA (SVT/ST)(%)
1		NM	NM	NM	NM
2		NM	NM	NM	NM
3		NM	NM	NM	NM
4		NM	NM	NM	NM
5	ARRANQUE	100.913	49.040	51.873	51.40
6		154.336	50.428	103.908	67.33
7		109.420	54.938	54.482	49.79
8		130.648	65.450	65.198	49.90
9		114.363	57.430	56.933	49.78
10		142.270	72.197	70.074	49.25
11		130.006	64.316	65.690	50.53
12		139.821	69.957	69.864	49.97
13		129.546	66.946	62.600	48.32
14	ETAPA I	138.82	65.56	73.26	52.77
15		133.62	69.21	64.41	48.20
16		133.49	72.54	60.96	45.66
17		152.81	59.22	93.58	61.24
18		114.68	58.88	55.80	48.66
19		151.82	67.52	84.30	55.53
20		101.19	51.04	50.15	49.56
21		150.26	65.01	85.25	56.73
22		127.38	65.45	61.94	48.62
23		147.54	81.39	66.16	44.84
24	ETAPA II	100.00	60.44	39.56	39.56
25		119.88	61.18	58.70	48.97
26		117.15	60.66	56.49	48.22
27		114.28	57.91	56.37	49.33
28		127.41	64.89	62.51	49.07

Fuente: Elaboración propia

NM: Valor no medido.

Tabla 14. Promedio de concentración de sólidos en los lodos presentes en el reactor UASB-TS

VALOR	CUADRADOS			
	SÓLIDOS TOTALES (mg/g)	SÓLIDOS FIJOS TOTALES (mg/g)	SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (mg/g)	FRACCIÓN ORGÁNICA (SV/ST)(%)
ARRANQUE				
PROMEDIO	123.83 ± 20.68	54.96 ± 6.43	68.87 ± 20.84	54.61 ± 7.37
VALOR MAX.	154.34	65.45	103.91	67.33
VALOR MIN.	100.91	49.04	51.87	49.79
ETAPA I				
PROMEDIO	131.87 ± 14.76	64.57 ± 6.34	67.30 ± 11.68	50.79 ± 3.92
VALOR MAX.	152.81	72.54	93.58	61.24
VALOR MIN.	101.19	51.04	50.15	45.66
ETAPA II				
PROMEDIO	125.49 ± 15.75	64.62 ± 6.82	60.87 ± 11.85	48.17 ± 4.49
VALOR MAX.	150.26	81.39	85.25	56.73
VALOR MIN.	100.00	57.91	39.56	39.56

Fuente: Elaboración propia

4.1.8. Producción de metano

Durante las 3 primeras semanas de monitoreo se obtuvieron valores errados debido a la poca hermeticidad del reactor, los cuales fueron subsanados y a partir del cual se pudo cuantificar con mayor exactitud el volumen de producción del biogás.

Se puede apreciar en el Gráfico 15 la evolución de la producción de metano, mientras que en la Tabla 15 se indica los valores promedios de producción por etapas de la investigación.

Los valores de producción van en el rango desde los 26.37 L hasta los 34.69 L, teniendo también valores promedio de 26.72 ± 0.36 L en la etapa de arranque, 28.15 ± 0.36 L en la etapa I y 33.89 ± 0.94 L correspondiente a la etapa II; lo cual evidencia un marcado ascenso en la producción de metano, que va de la mano con la época del año y el aumento de temperatura que este representa.

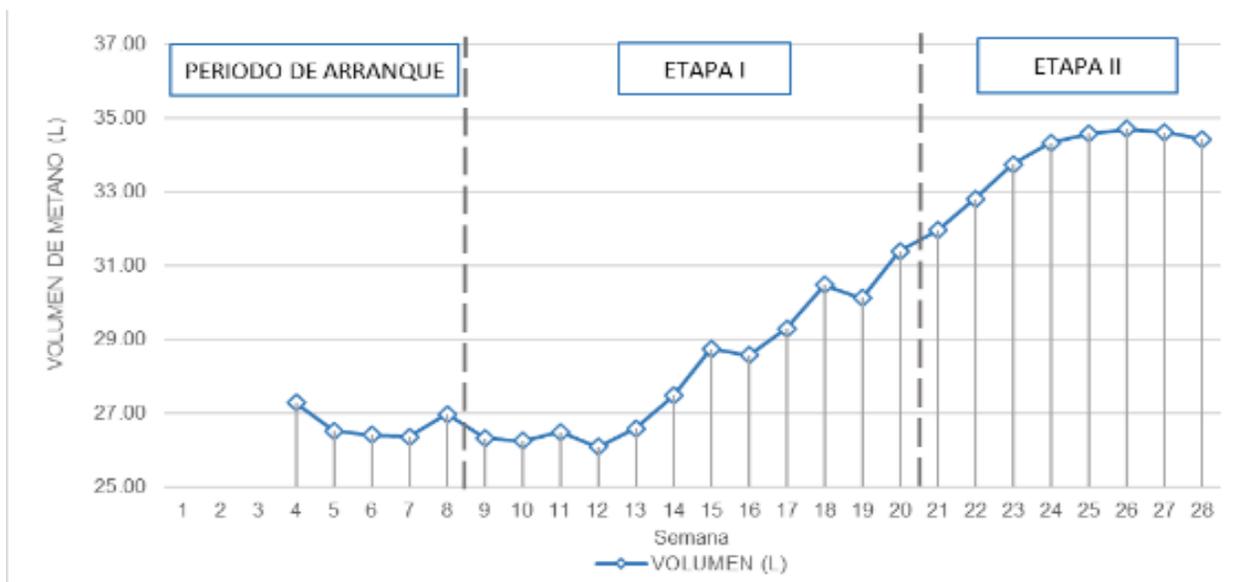


Gráfico 15. Producción de metano en reactor UASB-TS

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 15. Valores promedio de Producción de metano en el reactor UASB-TS

	VOLUMEN DE METANO (L)		
	ARRANQUE	ETAPA I	ETAPA II
PROMEDIO	26.72 ± 0.36	28.15 ± 1.79	33.89 ± 0.94
VALOR MAX.	27.29	31.39	34.69
VALOR MIN.	26.37	26.09	31.95

Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusión de los resultados

En el siguiente capítulo se presenta la discusión de los resultados a las pruebas de laboratorio, esto con el fin de demostrar los objetivos e hipótesis marcados de la investigación.

4.2.1. Sólidos en agua residual

4.2.1.1. Sólidos totales

Como punto de partida se analizó, la concentración de lodos, con respecto al volumen de líquido de acuerdo a lo indicado por Metcalf & Eddy (1995), quien afirma que la representatividad de sólidos totales, en un volumen de muestra de lodo anaerobio crudo es

del 2 a 8%. En el caso de las muestras que se obtuvieron, estas tenían un peso de 30 ± 0.1 mg, y se tienen valores de ST (para las etapas I y II) que van del rango de 628 a 1116 mg/L, se consigue una representatividad porcentual de 2.09 a 4.01 %, por lo que se podría afirmar que el agua residual analizada cumple con las condiciones esperadas para un agua residual municipal.

Con respecto al comportamiento en la remoción de este parámetro por el reactor UASB-TS; si bien, hay picos de eficiencia de remoción de hasta 44.8 %, no se puede afirmar que el reactor tenga una eficiencia comprobada en su remoción, esto se puede explicar también porque los reactores de procesos anaerobios tienen una baja producción de lodos, lo que se pudo apreciar con las mediciones realizadas en los trabajos de mantenimiento del reactor, en los que no se observó una variación del nivel de lodo a largo de toda la investigación.

4.2.1.2. Sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles

La determinación de la remoción de sólidos suspendidos totales, es uno de los pilares de la investigación, esto debido a la importancia de este parámetro en los procesos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Sin considerar la etapa de arranque, en la que se obtuvieron eficiencias pico de hasta 95.94% de remoción de sólidos suspendidos totales, se puede considerar que el reactor UASB-TS es un proceso con eficiencias de remoción de este parámetro que van desde un 49.57 % de eficiencia en la etapa I, hasta unos 72.38 % de eficiencia para la etapa II, por lo que se podría afirmar que la eficiencia en remoción de este parámetro, en las condiciones descritas en capítulos anteriores, brinda eficiencias por encima del 50%.

Tomando en cuenta estas conclusiones se puede afirmar que, para los casos de los sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles; se obtienen eficiencias relativamente altas en remoción dentro del reactor UASB-TS, estos se encuentran en el rango de 69.5% hasta 82.11%, que, para el caso de los SSF, alcanzan picos de hasta 91.18 % de remoción.

4.2.2. Determinación de la fracción orgánica (SVT/ST) en lodos

Se aprecia, en el Gráfico 14, que los valores de las concentraciones de sólidos, tanto los sólidos totales, como los sólidos volátiles y sólidos fijos han permanecido casi constante, con pequeñas variaciones entre las etapas I y II, viéndose inalteradas por los cambios de condiciones entre las etapas I y II y por las condiciones climáticas variables entre ambas etapas de investigación.

Por lo cual, al tener estos valores de concentración de sólidos relativamente constantes, se determinó la fracción orgánica de los lodos, cuyo indicador principal estará dado por la relación SV/ST (%), permaneció casi constante a lo largo de toda la investigación, con valores máximos de 67.33%, 61.24% y 56.73% correspondientes a las etapas de arranque, etapa I y etapa II respectivamente, y con valores promedios de $54.61 \pm 7.37\%$, $50.79 \pm 3.92\%$ y $48.17 \pm 4.49\%$, correspondientes a las mencionadas etapas respectivamente. Entonces se puede considerar el lodo anaerobio dentro del reactor tiene un buen grado de estabilización en términos de la relación SV/ST, el cual se observó un valor promedio de entre 48 a 52% para las etapas I y II.

4.2.3. Demanda bioquímica de oxígeno DBO

La eficiencia en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno tiene un comportamiento con una tendencia positiva a lo largo de todas las etapas de la investigación, como se puede apreciar en el Gráfico 4, en el que se observa un crecimiento constante con respecto al tiempo, estas eficiencias tienen valores que llegan desde los valores mínimos, que

corresponden a la Etapa I de investigación, con valores de 22.17% y un promedio de etapa de 34.45 ± 7.45 %, y que fueron tomados en la etapa más fría del año, y más húmeda; y del mismo modo, se han registrado valores máximos, correspondientes a la Etapa II, con valores de hasta 65.32% con un promedio de etapa de 52.06 ± 9.44 %, cuyos valores han sido tomados en la época más cálida del año.

Las eficiencias de remoción de DBO_5 encontradas para esta tecnología de tratamiento de aguas residuales son comparadas con las encontradas por Salazar (2005), quien encontró valores de eficiencia de remoción de la DBO_5 que oscilan entre los 30% hasta los 40%, pudiendo apreciar que la tecnología que se utilizó para esta investigación tiene eficiencias mucho mayores a las de un tanque séptico común.

Por otro lado, al comparar las eficiencias del reactor UASB-TS con los resultados obtenidos por Uribe, Gómez, & Zafra (2019) del reactor UASB (66%) se ve que las eficiencias del último mencionado son superiores, pero esta última necesita de operación mucho más capacitada, por lo que se puede considerar que el reactor UASB-TS es una tecnología promedio, que mejora el funcionamiento del tanque séptico convencional, que podría ser utilizado mayormente en zonas rurales del Perú, copiando ciertas condiciones de operación del reactor UASB.

4.2.4. Producción de metano

El Gráfico 15 y la Tabla 15 representan el comportamiento de la producción de metano y su marcado crecimiento al largo de las etapas de investigación, cuya principal razón se debe a el incremento de temperatura ambiental, por la llegada de la estación del verano, en donde se alcanzó el pico más alto de producción de dicho parámetro, cuyo valor fue de 34.69 L/d.

Como se puede observar en la Tabla 16 presentada, en la que se evalúa el origen de este parámetro, para el cual se ha realizado la comparativa con valores históricos de producción de DQO registrados en el CITRAR-FIA UNI.

Tabla 16. Porcentaje de conversión de DQO a metano (CH₄)

SEMANA DE EVALUACIÓN	V (L)	T (°C)	PRESIÓN ATMOS. (BAR)	F.C.ml CH ₄ /g DQO	DQO EQ. (g DQO)/d	DQO af (mg/L)	DQO ef (mg/L)	DQO af (g/d)	DQO ef (g/d)	DQO variación (g/L)	DQO convertido en CH ₄ (gDQO/d)	% de DQO convertido
SEMANA 1	NM	17.45	0.9988	372.82	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
SEMANA 2	NM	17.68	0.9975	373.59	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
SEMANA 3	NM	17.68	0.9985	373.23	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
SEMANA 4	27.29	20.03	0.9981	376.39	72.49	601	273	9346.752	4245.696	5101.056	72.49	1.42%
SEMANA 5	26.53	17.17	0.9978	372.83	71.16	381	203	5925.312	3157.056	2768.256	71.16	2.57%
SEMANA 6	26.42	19.35	0.9982	375.48	70.35	317	237	4929.984	3685.824	1244.16	70.35	5.65%
SEMANA 7	26.37	18.86	0.9984	374.78	70.35	463	325	7200.576	5054.4	2146.176	70.35	3.28%
SEMANA 8	26.98	19.80	0.9976	376.29	71.70	345	302	5365.44	4696.704	668.736	71.70	10.72%
SEMANA 9	26.33	20.94	0.9972	377.90	69.66	568	435	8833.536	6765.12	2068.416	69.66	3.37%
SEMANA 10	26.25	21.02	0.9965	378.27	69.39	459	422	7138.368	6562.944	575.424	69.39	12.06%
SEMANA 11	26.50	18.00	0.9971	374.16	70.81	387	278	6018.624	4323.456	1695.168	70.81	4.18%
SEMANA 12	26.09	21.62	0.9975	378.66	68.89	345	268	5365.44	4167.936	1197.504	68.89	5.75%
SEMANA 13	26.59	22.08	0.9974	379.29	70.10	567	482	8817.984	7496.064	1321.92	70.10	5.30%
SEMANA 14	27.48	22.38	0.9976	379.60	72.39	303	263	4712.256	4090.176	622.08	72.39	11.64%
SEMANA 15	28.75	22.13	0.9981	379.10	75.84	380	370	5909.76	5754.24	155.52	75.84	48.76%
SEMANA 16	28.57	23.83	0.9983	381.19	74.95	335	310	5209.92	4821.12	388.8	74.95	19.28%
SEMANA 17	29.29	26.60	0.9988	384.56	76.16	280	254	4354.56	3950.208	404.352	76.16	18.84%
SEMANA 18	30.48	24.50	0.9991	381.75	79.84	384	280	5971.968	4354.56	1617.408	79.84	4.94%
SEMANA 19	30.11	27.80	0.9993	385.91	78.02	237	247	3685.824	3841.344	-155.52	78.02	-50.17%
SEMANA 20	31.39	28.07	0.9991	386.33	81.25	340	297	5287.68	4618.944	668.736	81.25	12.15%
SEMANA 21	31.95	29.20	0.9994	387.67	82.42	370	177	5754.24	2752.704	3001.536	82.42	2.75%
SEMANA 22	32.80	30.73	0.9997	389.51	84.21	352	301	5474.304	4681.152	793.152	84.21	10.62%
SEMANA 23	33.75	29.58	0.9992	388.23	86.93	332	232	5163.264	3608.064	1555.2	86.93	5.59%
SEMANA 24	34.32	28.13	1.0004	385.91	88.94	450	397	6998.4	6174.144	824.256	88.94	10.79%
SEMANA 25	34.57	29.20	1.0002	387.36	89.25	255	245	3965.76	3810.24	155.52	89.25	57.39%
SEMANA 26	34.69	31.55	1.0006	390.21	88.89	395	370	6143.04	5754.24	388.8	88.89	22.86%

SEMANA DE EVALUACIÓN	V (L)	T (°C)	PRESIÓN ATMOS. (BAR)	F.C.ml CH4/g DQO	DQO EQ. (g DQO)/d	DQO af (mg/L)	DQO ef (mg/L)	DQO af (g/d)	DQO ef (g/d)	DQO variación (g/L)	DQO convertido en CH4 (gDQO/d)	% de DQO convertido
SEMANA 27	34.61	32.26	1.0005	391.16	88.47	327	289	5085.504	4494.528	590.976	88.47	14.97%
SEMANA 28	34.42	32.24	1.0011	390.90	88.05	431	350	6702.912	5443.2	1259.712	88.05	6.99%
VALORE PROMEDIO						384.16	304.28	5974.45632	4732.16256	1242.29376	77.62	16.88%

FUENTE: Elaboración propia

NM: No Medido

V: Volumen; T: Temperatura

Como puede observarse las concentraciones de DQO que se consumen en el reactor por día, los cuales son superiores a los representados por la conversión a metano (CH4), teniendo que en promedio únicamente el 16.88% del DQO que se consume en el reactor UASB-TS se convierte en metano CH4, sin considerar las posibles fugas que se puedan presentar en el reactor, que deben ser mínimas por el grado de hermeticidad que este posee.

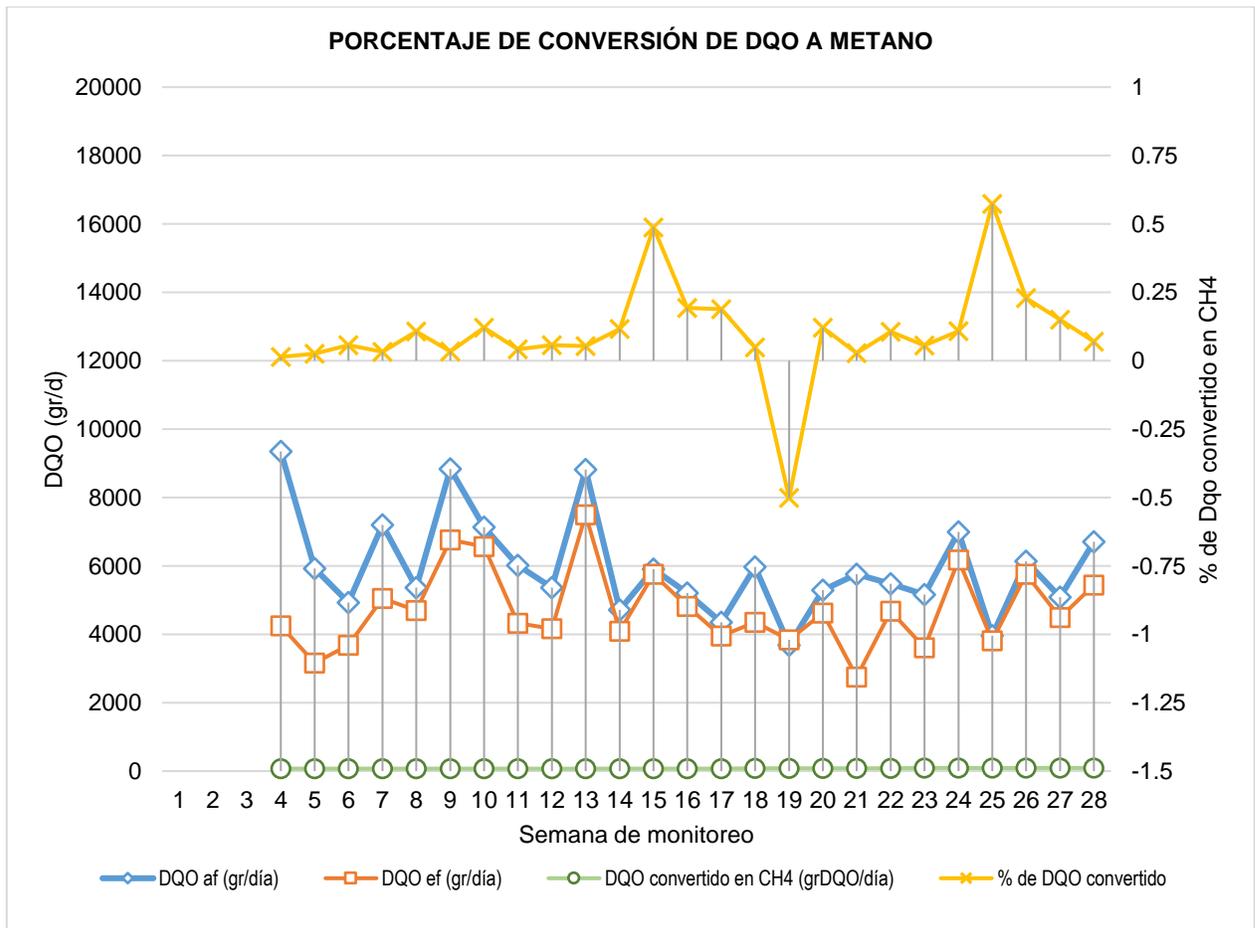


Gráfico 16. Porcentaje de conversión de DQO consumido en reactor a metano (CH₄)

FUENTE: Elaboración propia

4.2.5. Turbiedad

En el Gráfico 1 se observa el decrecimiento en los valores registrados de Turbiedad en el efluente del reactor, formando una curva casi constante en descenso continuo, La Tabla 9 acentúa el aumento en la eficiencia de la remoción de turbiedad en el reactor UASB-TS, a lo largo de las 3 etapas experimentales, adicionalmente se puede observar el crecimiento porcentual de la eficiencia en la parte superior del gráfico.

Este crecimiento en la eficiencia de remoción de la turbiedad se da debido a varios factores, pero a efectos de poder resumir estos factores, se puede concluir tres principales, el primero es debido a la estabilización de la materia orgánica dentro del reactor, el cual se logró con el paso del tiempo en la etapa de arranque, el segundo debido al aumento de temperatura en el medio ambiente, debido a que la etapa de arranque se realizó a finales de la temporada de verano y los picos más altos se consiguieron a inicios de la temporada del verano del siguiente año, y por último el tercer factor se debe a la disminución del caudal en el reactor, con el paso de la etapa I hacia la etapa II, la cual permitía un mayor tiempo de retención.

4.2.6. pH

En el Gráfico 6 se puede apreciar que los valores promedio de pH en el afluente del reactor se encuentran en el rango de 7.2 a 8.0, notándose una ligera tendencia al crecimiento constante a lo largo de todas las etapas de la investigación. Este incremento en la concentración del pH se puede deber a que en la temporada fría la cantidad de agua potable que ingresa al alcantarillado es menor a la que ingresa en la temporada de verano, que es donde se realiza un mayor uso de los aparatos sanitarios.

También se puede apreciar un decrecimiento en la concentración del pH en el efluente del reactor, esto se debe principalmente al grado de estabilización dentro del reactor, a medida que avanzaba el tiempo se pudo observar que la capacidad buffer dentro del reactor era mucho mayor, haciendo que el medio dentro del mismo sea más ácido, esto también mejora las condiciones de tratamiento dentro del reactor, el cual se puede apreciar al hacer un comparativo con otros parámetros medidos en paralelo.

4.2.7. Temperatura

Analizando el Gráfico 3 se puede observar un comparativo entre las temperaturas ambiente, temperaturas del afluente y efluente y la humedad relativa del ambiente, se puede apreciar, debido al cambio de condiciones climáticas a lo largo de todas las etapas de investigación, un incremento en todas las temperaturas.

Por otro lado, se aprecia también que la temperatura ambiental varía de acuerdo a la época del año, pudiéndose observar que la temperatura ambiente y las del agua residual son muy similares durante la época fría del año y que esta diferencia crece a medida que la temperatura ambiente crece, notándose una diferencia de aproximadamente 3°C en la época cálida, lo cual corrobora lo indicado por Romero (2017). Este incremento de temperatura ambiente también está ligado directamente con la humedad relativa, la cual decrece cuando se aproxima más a las temporadas cálidas.

Por otro lado, el incremento en la temperatura ambiente también se relaciona directamente con el incremento de la eficiencia de remoción de diversos parámetros indicados en el Gráfico 17. En dicho gráfico se aprecia que el crecimiento de los parámetros indicados, tales como, DBO, Sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad, y producción de metano (CH₄); y del mismo modo uno de los parámetros más importantes en la investigación, que es

el fracción de materia orgánica dentro de los lodos permanece prácticamente constante, viéndose inmutable con la variación de la temperatura.

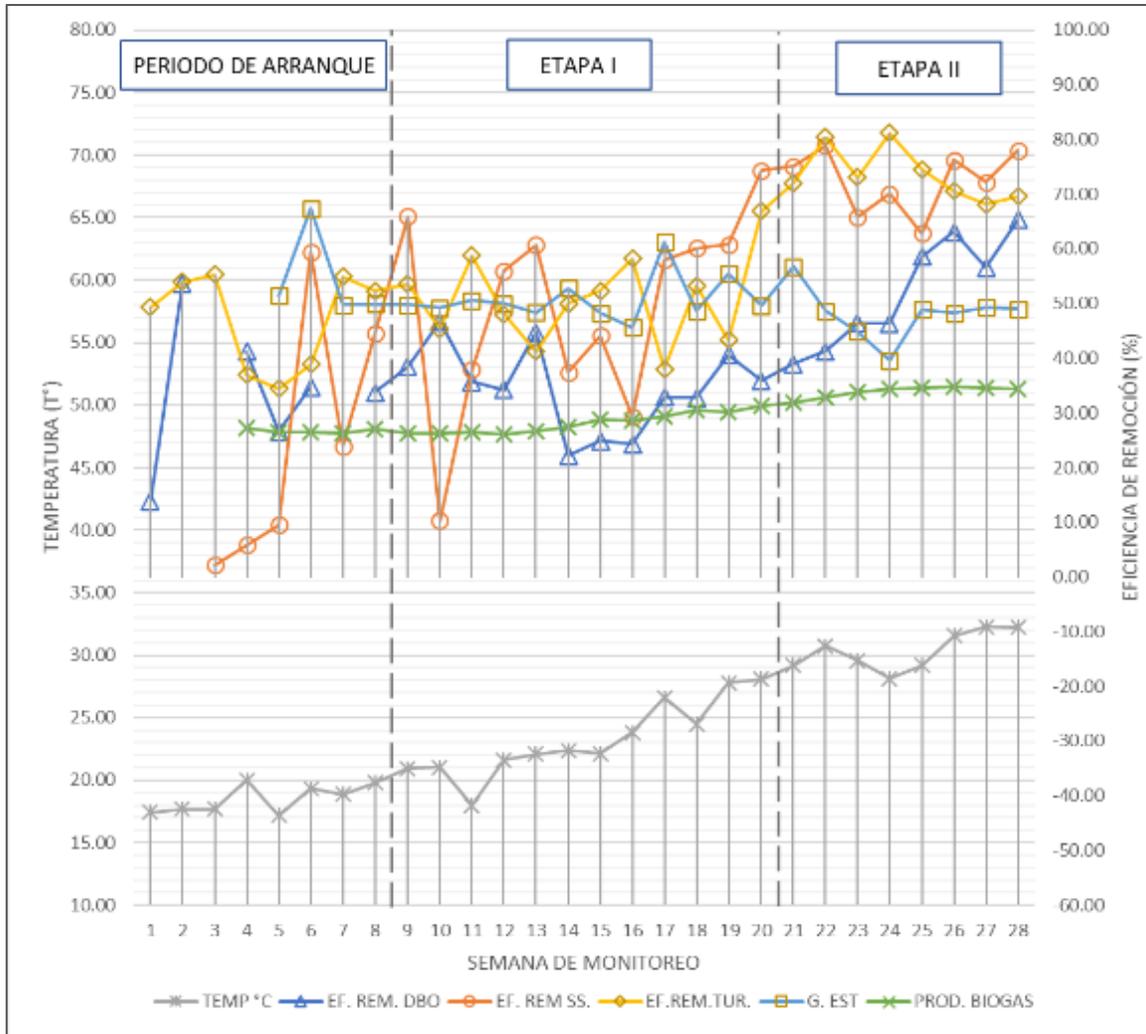


Gráfico 17. Comparativa de evolución de parámetros, con respecto al aumento de la temperatura ambiental

Fuente: Elaboración propia

4.2.8. Cumplimiento de LMP'S Y ECA'S

En el cumplimiento de la normativa vigente se plantea que las tecnologías de tratamiento sean diseñadas de tal manera que puedan cubrir las demandas de las entidades fiscalizadoras, que con estos planean evitar o reducir el riesgo de afectación e impacto a las fuentes de aguas receptoras o a los sistemas de descarga.

Por tal motivo se definen los LMP's y ECA's, el primero implementado mediante DS. N°003-2010-MINAM, el que se aplica para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR), en la Tabla 17 se muestra los siguientes parámetros y sus valores máximos permitidos para descargas.

Por otro lado los ECA's se aplican cuando estos efluentes serán descargados a un cuerpo de agua, estos decretados bajo D.S.N° 004-2017-MINAM, en la Tabla 17 se muestra los siguientes parámetros y sus valores máximos permitidos para descargas.

Debido a la naturaleza de cumplimiento de estas normativas se realizó la comparativa entre las concentraciones normadas y las determinadas en la investigación.

Para la comparativa se tomo en cuenta la etapa II de la investigación, la cual presenta eficiencias mayores en la mayoría de parámetros medidos, estos parámetros se pueden apreciar en la Tabla 17.

Tabla 17. Comparativa de LMP, ECA's y Valores medidos en el efluente del reactor UASB-TS

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP(*)	ECA's CATEGORÍA 4			VALOR MEDIDO EFLUENTE UASB-TS
			E1. LAGUNAS Y LAGOS	E2. RÍOS	E3. ECOSISTEMAS COSTEROS Y MARINOS	
Aceites y grasas	mg·L ⁻¹	20	5	5	5	NM
Coliformes Termotolerantes	MPN/100mL	10 000	1000	2000	2000	NM
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg·L ⁻¹	100	5	10	10	106.01 (**)
Demanda Química de Oxígeno	mg·L ⁻¹	200	NI	NI	NI	NM
pH	Unidad	6.5 - 8.5	6.5 - 9.0	6.5 - 9.0	6.8 - 8.5	6.6 - 7.0
Sólidos Totales Suspendidos	mg·L ⁻¹	150	< 25	< 100 - 400	< 30	46.5 (**)
Temperatura	°C	< 35	Δ 3	Δ 3	Δ 2	< 29.0

Fuente: D.S.N°003-2010-MINAM

D.S.N°004-2017-MINAM

(*) LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUA.

(**) VALOR MEDIDO EN LA ETAPA II DE LA INVESTIGACIÓN

NM: NO MEDIDO / NI: NO INDICA

Del cuadro comparativo se aprecia que, para el caso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), el valor medido en el efluente del reactor UASB-TS (valor correspondiente a la etapa II), es de 106.01 mg/L, el cual es superior a los valores normados, tanto en los LMP como en los ECA's, por tal motivo se deberá considerar la implementación de un sistema de tratamiento adicional para disminuir estas concentraciones.

En el caso de los sólidos suspendidos totales (SST), el valor medido en el efluente del reactor UASB-TS (correspondiente a la etapa II), es de 46.5 mg/L, el cual cumple con lo estipulado en los LMPs pero para el caso de los ECA's, este efluente podría ser descargado solo a cuerpos de agua de sub categoría E2. Ríos, siendo necesario una unidad de tratamiento adicional para poder disminuir la concentración de este parámetro y poder descargar en cuerpos de agua de sub categoría E1. Lagunas y lagos y E3. Ecosistemas marinos.

Conclusiones

1. La hipótesis planteada se cumple debido a que el reactor UASB-TS logró eficiencias elevadas con respecto a la remoción de sólidos suspendidos totales, obteniendo eficiencias promedio de 49.57 ± 17.38 y en la etapa I y $72.38 \pm 5.417\%$ en la etapa II, con valores pico de 78.89% correspondiente a la etapa II, y valores entre los 26 mg/L correspondiente a la etapa I y 135 mg/L correspondiente a la etapa II.
2. El valor de la fracción orgánica en los lodos (SV/ST), se mantuvo constante a lo largo de todas las etapas de la investigación, alrededor de 50% , con valores pico de 67.33% que solo se generó de manera puntual y 48.20% como valor mínimo. Estas variaciones podrían relacionarse con la variación de la calidad del agua residual.
3. La producción de metano es un parámetro que fue relativamente constante y que se encuentra estrechamente relacionado con la variación de temperatura, teniendo valores de producción en un rango de 26.09 L hasta 34.69 L de CH_4 .
4. La producción de metano representa aproximadamente al 16.88% de la DQO que se consume en el reactor UASB-TS.
5. El reactor UASB-TS logró superar las expectativas planteadas en la hipótesis, en cuanto a la remoción del parámetro DBO_5 , obteniendo eficiencias de hasta 65.32% y con un promedio de $52.06 \pm 9.44 \%$.
6. Los valores de la DBO en el efluente fueron; para la etapa I $135.96 \pm 12.07 \text{ mg/L}$ y para la etapa II $106.01 \pm 23.73 \text{ mg/L}$ de DBO_5 ,
7. La remoción de sólidos totales en el reactor UASB-TS son bajas, con respecto a la eliminación de sólidos suspendidos totales, ya que la eficiencia promedio es de $33.64 \pm 8.86\%$ y el valor pico máximo es de 44.76% .
8. El reactor UASB-TS presentó eficiencias superiores al 48% y de hasta un 87.1% en remoción de turbiedad, la cual se relaciona estrechamente con la variación de

temperatura y el tiempo de retención hidráulica en el mismo, pudiéndose considerar esta eficiencia relativamente buena para un sistema de pre-tratamiento.

9. El efluente del reactor UASB-TS presenta una concentración de DBO_5 superior a lo indicado en los LMP's y en los ECA's categoría 4, por tal motivo de necesitar cumplir con esta normativa se tendrá que implementar un sistema de tratamiento adicional para cumplir con dicho parámetro.

Recomendaciones

1. Ampliar el periodo de investigación a fin de poder cubrir un ciclo de por lo menos 1 año, para poder evaluar a mayor detalle las variaciones de concentración de los parámetros estrechamente ligados a esta.
2. Para incrementar la eficiencia del funcionamiento es recomendable adicionar otro tipo de tratamiento, preferentemente secundario para mejorar las características del efluente y cumplir con los LMPs.
3. Evaluar la mejora de las eficiencias del reactor con una altura mayor de lodo anaerobio, recomendando por lo menos 1m de profundidad.
4. Considerar tiempos de almacenamiento mayores para el biogás, debido a que al hacerse de manera diaria y realizar la apertura constante se pierde la concentración del biogás dentro del tanque y no se considera de manera correcta el volumen interno del tanque antes del llenado de las bolsas.
5. Se recomienda realizar un análisis de conteo de huevos de helminto en el lodo del reactor.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, S., Vargas, M., & Zeron, M. (2018). *Tratamiento Primario de Aguas Residuales Servidas Mediante Tanque Séptico en Urbanización de Lurigancho, Lima*. Lima, Perú: Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- American Public Health Association. (2017). *Methods for the Examination of Water and Wastewater*. EE.UU.: American Public Health Association.
- Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos en Estelí, Nicaragua*. Llehanés, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Beas, Y. (2015). Capacidad de eliminación de huevos de helmintos de los reactores UASB en condiciones subtropicales. *FIA-UNI*.
- Becerra, D., Correa, D., & Moreno, Y. (2022). *Reactor UASB como Técnica para el Tratamiento de Contaminantes de Aguas Residuales y Lixiviados*. Cartagena - Colombia: ING-NOVA INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA.
- Chernicharo, C. (2007). *Principios do tratamento biológico de águas residuárias*. Minas Gerais, Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais.
- CONAGUA MX. (2011). DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE. *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO CONAGUA*.
- Constantino, L., Morena, M., & Hernández, B. (2015). *Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP*.

El Conagua. (2013). *DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS*. MEXICO D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Encarnación, G., & Enrique, E. (2014). *Evaluación técnica ambiental de un reactor anaerobio de alta concentración de sólidos volátiles*. Quito: Escuela Politécnica Nacional (EPN).

ENVIRONMENTAL PROTECCIÓN AGENCY FEDERAL REGISTER, EPA. (2002). *Title 40 - Protection of Environment: part 503 - Standards for the Use or Disposal of Sewagq Sludge*. United States: Environmental Protection Agency.

Guardia, Y. (2012). *Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Guerrero, L. (2012). *¿Qué es el biogás?* Madrid.

Hernandez, M. A. (1992). *Depuración de aguas residuales*. Madrid, España: Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid.

Jara, L. (2018). *Reducción de Coliformes Termotolerantes del Lodo residual generado en el reactor UASB mediante Tratamiento Químico*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental.

Lorenzo, Y., & Obaya, C. (2006). *LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y LOS REACTORES UASB*. LA HABANA, CUBA: INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIÓN DE LOS RERIVADOS DE LA CAÑA DE AZUCAR.

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid España: Impresos y Revistas IMPRESA S.A.

Meza, A. (2018). *Propuesta de Implementación de Filtro Intermittente de Arena para el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas en la Central Termoeléctrica AM Power*. Lima, Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLAREAL, FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA AMBIENTAL Y ECOTURISMO.

MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF. (2011). *MANUAL DE BIOGAS*. Santiago de Chile.

Munroe, L., & Nichols, M. (1929). *Análisis de Gases*. Michigan, USA: Macmillan, 1929.

Noyola, A. (2000). *Alternativas de tratamiento de aguas residuales (3a ed.)*. Mexico D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Desarrollo Profesional e Institucional.

Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía Para el Diseño de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización*. Lima.

Oropesa, N. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*. Quintana Roo, México: Coa Conciencia, Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo.

Palacios, C. (2021). *Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal de Portoviejo*. Ecuador: UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS.

Parra, B., & Torres, P. (2016). *Evaluación de lodos de PTAR municipales como inóculos en la digestión anaerobia de biorresiduos*. Cali Colombia: Universidad del Valle.

Romero. (2017). *Tratamiento de Aguas Residuales*. *Escuela Colombiana de Ingeniería*.

Rossum, J., & Villarruz, P. W. (1950). *Un nuevo método para determinar el metano en el agua*. EE.UU.: Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas.

Salazar, L., Uribe, L., Gómez, L., & Zafra, C. (2019). *Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales*. Bogotá D.C. - Colombia: Escuela

de Posgrados Universidad Manuela Beltrán, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Salazar, P. (2005). Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de agua residuales en sectores rurales. *Universidad Austral de Chile*, 1-2.

SUNASS. (2022). *Diagnóstico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el Ámbito de las Empresas Prestadoras 2022*. Lima - Perú: Dirección de Fiscalización - SUNASS.

Torres, P., & Pérez, A. (2010). *Actividad Metanogénica Específica: Una Herramienta de Control y Optimización de Sistemas de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*. Cali, Colombia: Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - Universidad del Valle.

Yaya, R., Ayala, C., Kujawa, K., Van Lier, J., & Zeeman, G. (2015). *Capacidad de eliminación de huevos de helmintos de los reactores UASB en condiciones subtropicales*. Lima, Perú: Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima 25, Perú; Subdepartamento de Tecnología Ambiental, Universidad de Wageningen, Wageningen 6700 AA, Países Bajos.

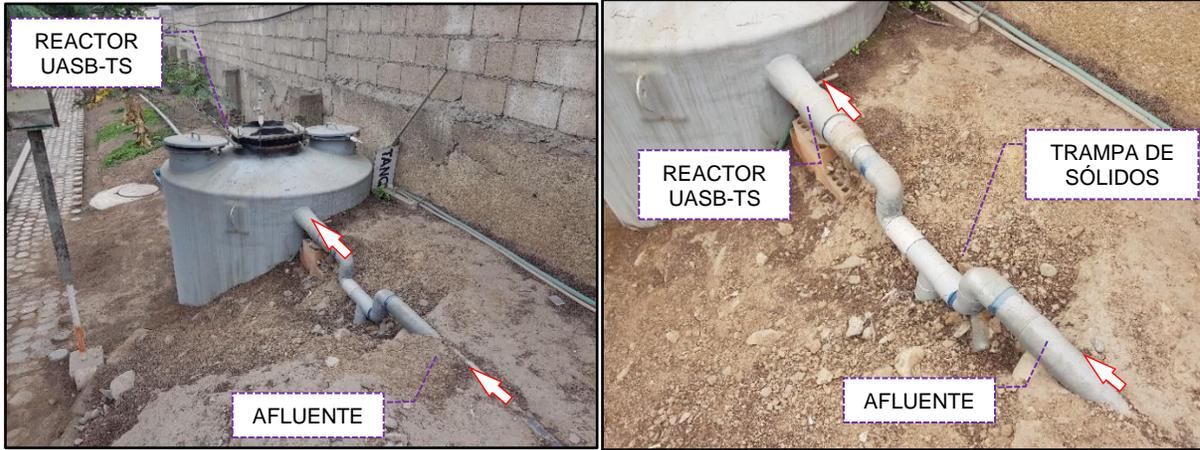
Anexos

Anexo 1.	Esquematización de sistemas de reactor UAS-TS.....	- 1 -
Anexo 2.	Sistema de captación de Biogás.....	- 5 -
Anexo 3.	Determinación de pruebas de laboratorio	- 7 -
Anexo 4.	Tabla de resultados generales de sólidos Totales, Suspendidos, Disueltos, Fijos y Volátiles y sus eficiencias.....	- 8 -

Anexo 1. Esquematzación de sistemas de reactor UASB-TS

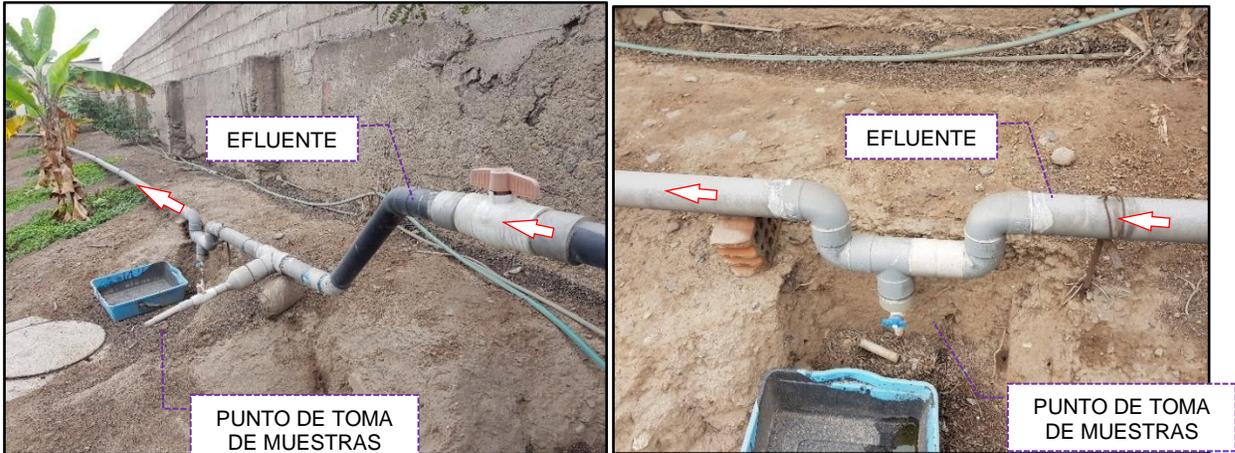
a. Afluente Reactor UASB-TS

Imagen 1. Sistema de captación por medio de tuberías de PVC de 3"



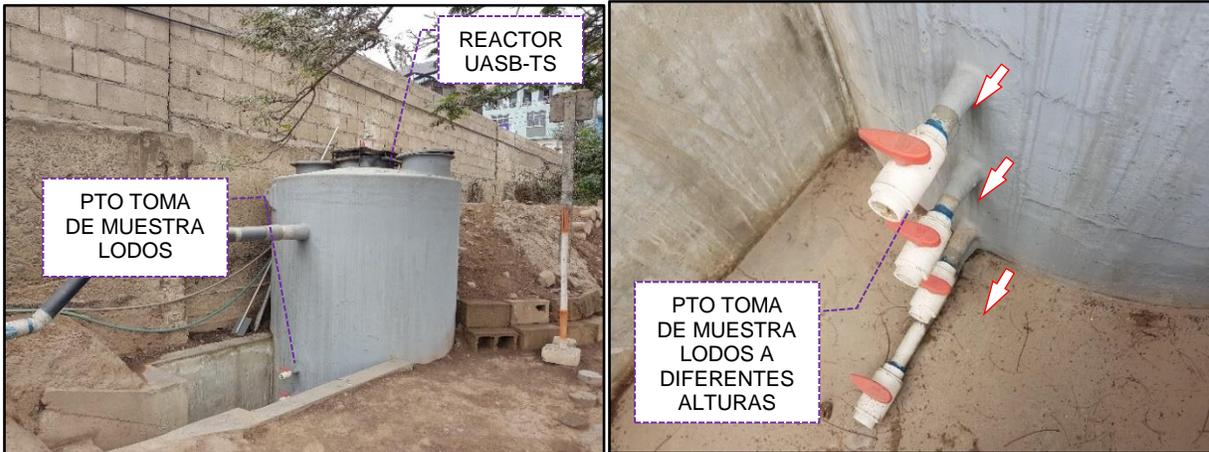
b. Efluente Reactor UASB-TS

Imagen 2. Sistema de recolección de agua tratada.



c. Punto de Monitoreo Lodo

Imagen 3. Sistema de recolección de lodos y purga del tanque UASB-TS



d. Punto de captación de biogás.

Imagen 4. Sistema de captación de Biogás.



e. Sistema de captación por bombeo

Debido al bajo caudal de ingreso al reactor se vio por necesaria la inclusión de un sistema de captación por bombeo que cuente con un sistema de control de sólidos, por lo cual se incluyó al esquema una canastilla filtro de fabricación artesanal, la cual permitirá (1) que el flujo se mantenga constante dentro de la bomba, evitando que esta se obture, y (2) que el funcionamiento sea continuo e ininterrumpido, necesitando un solo mantenimiento diario.

Imagen 5. Captación del agua residual cruda para el reactor UASB-TS



f. Determinación de parámetros rutinarios

Imagen 6. Equipos utilizados para determinación de parámetros rutinarios



Imagen 7. Instalaciones Citrar FIA-UNI



Anexo 2. Sistema de captación de Biogás.

Imagen 8. Ensamblaje de sistemas de almacenamiento y prueba de hermeticidad.



Imagen 9. Ensamblaje de sistema de almacenamiento de Biogás.



Imagen 10. Sistema de lavado de Biogas, para eliminación del CO₂.



Anexo 3. Determinación de pruebas de laboratorio

Imagen 11. Secado de muestras de aguas residuales y lodos para determinación de sólidos totales



Imagen 12. Llevado a Horno para determinación de sólidos totales y Muffla para determinación de sólidos fijos y volátiles



Imagen 13. Determinación de DBO, toma de muestras y dilusión.



Anexo 4. Tabla de resultados generales de sólidos Totales, Suspendidos, Disueltos, Fijos y Volátiles y sus eficiencias

Tabla 18. Resultados de determinación de sólidos totales, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS

SE M A N A	FASE	SÓLIDOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS FIJOS TOTALES (mg/L)			SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (mg/L)		
		AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
1	ARRANQUE									
2										
3		820	764	6.8	428	424	0.9	392	340	13.3
4		796	740	7	392	364	7.1	404	376	6.9
5		988	744	24.7	596	348	41.6	392	396	
6		1164	508	56.4	688	248	64	476	260	45.4
7		852	716	16	412	432		440	284	35.5
8		1156	580	49.8	596	296	50.3	560	284	49.3
9	ETAPA I	1104	724	34.4	636	432	32.1	468	292	37.6
10		808	656	18.8	496	448	9.7	312	208	33.3
11		756	648	14.3	432	388	10.2	324	260	19.8
12		864	616	28.7	568	440	22.5	296	176	40.5
13		1012	568	43.9	512	76	85.2	500	492	1.6
14		1020	728	28.6	596	492	17.4	424	236	44.3
15		888	696	21.6	516	400	22.5	372	296	20.4
16		732	592	19.1	336	316	6	396	276	30.3
17		816	580	28.9	424	412	2.8	392	168	57.1
18		700	548	21.7	356	340	4.5	344	208	39.5
19		892	708	20.6	568	576		324	132	59.3
20	744	700	5.9	256	312		488	388	20.5	
21	ETAPA II	1116	940	15.8	628	684		488	256	47.5
22		1072	648	39.6	652	488	25.2	420	160	61.9
23		724	488	32.6	340	240	29.4	384	248	35.4
24		948	696	26.6	532	348	34.6	416	348	16.3
25		628	356	43.3	132	196		496	160	67.7
26		768	424	44.8	572	260	54.5	196	164	16.3
27		768	500	34.9	448	320	28.6	320	180	43.8
28		696	476	31.6	448	376	16.1	248	100	59.7

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 19. Resultados de determinación de sólidos en suspensión, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS

SEMANA	FASE	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN (mg/L)			SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN FIJOS (mg/L)			SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN VOLÁTILES (mg/L)		
		AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
1	ARRANQUE									
2										
3		136	133	2.2	14	17		122	116	4.9
4		120	113	5.8	69	8	88.4	51	105	
5		125.6	113.6	9.6	28.8	29.6		96.8	84	13.2
6		339	13.8	95.9	174	9.5	94.5	165	4.3	97.4
7		127	96.7	23.9	19	8	57.9	108	88.7	17.9
8		173	96	44.5	2	5.6		171	90.4	47.1
9	ETAPA I	263	89.6	65.9	41	20	51.2	222	69.6	68.6
10		107	96	10.3	29	32		78	64	17.9
11		161	100	37.9	28	4.8	82.9	133	95.2	28.4
12		189	83.2	56	6	18.4		183	64.8	64.6
13		200	78.7	60.7	66	29.3	55.6	134	49.3	63.2
14		216	135.2	37.4	61	47.2	22.6	155	88	43.2
15		123	68.8	44.1	7	4	42.9	116	64.8	44.1
16		103	72.8	29.3	27	15.2	43.7	76	57.6	24.2
17		230.7	96.8	58	53.3	17.6	67	177.3	79.2	55.3
18		190.7	76	60.1	32	10.7	66.7	158.7	65.3	58.8
19		234.7	92	60.8	105.3	49.6	52.9	129.3	42.4	67.2
20	197	50.5	74.4	105	14	86.7	92	36.5	60.3	
21	ETAPA II	204	50.8	75.1	52	11.3	78.4	152	39.6	74
22		244	51.5	78.9	5.3	11		238.7	40.5	83
23		105.3	36	65.8	22.7	2	91.2	82.7	34	58.9
24		232	69.5	70	20	3	85	212	66.5	68.6
25		105	39	62.9	42	11.5	72.6	63	27.5	56.3
26		193.3	46	76.2	81.3	10.5	87.1	112	35.5	68.3
27		190.7	53	72.2	61.3	15	75.5	129.3	38	70.6
28		118	26	78	20	3	85	98	23	76.5

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados de determinación de sólidos disueltos, fijos y volátiles de afluente y efluente del reactor UASB-TS

SEMANA	FASE	SÓLIDOS DISUELTOS (mg/L)			SÓLIDOS DISUELTOS FIJOS (mg/L)			SÓLIDOS DISUELTOS VOLÁTILES (mg/L)		
		AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
1	ARRANQUE									
2										
3		684	631	7.7	414	407	1.7	270	224	17
4		676	627	7.2	323	356		353	271	23.2
5		862.4	630.4	26.9	567.2	318.4	43.9	295.2	312	
6		825	494.3	40.1	514	238.5	53.6	311	255.8	17.8
7		725	619.3	14.6	393	424		332	195.3	41.2
8		983	484	50.8	594	290.4	51.1	389	193.6	50.2
9	ETAPA I	841	634.4	24.6	595	412	30.8	246	222.4	9.6
10		701	560	20.1	467	416	10.9	234	144	38.5
11		595	548	7.9	404	383.2	5.1	191	164.8	13.7
12		675	532.8	21.1	562	421.6	25	113	111.2	1.6
13		812	489.3	39.7	446	46.7	89.5	366	442.7	
14		804	592.8	26.3	535	444.8	16.9	269	148	45
15		765	627.2	18	509	396	22.2	256	231.2	9.7
16		629	519.2	17.5	309	300.8	2.7	320	218.4	31.7
17		585.3	483.2	17.4	370.7	394.4		214.7	88.8	58.6
18		509.3	472	7.3	324	329.3		185.3	142.7	23
19		657.3	616	6.3	462.7	526.4		194.7	89.6	54
20	547	649.5		151	298		396	351.5	11.2	
21	ETAPA II	912	889.2	2.5	576	672.7		336	216.4	35.6
22		828	596.5	28	646.7	477	26.2	181.3	119.5	34.1
23		618.7	452	26.9	317.3	238	25	301.3	214	29
24		716	626.5	12.5	512	345	32.6	204	281.5	
25		523	317	39.4	90	184.5		433	132.5	69.4
26		574.7	378	34.2	490.7	249.5	49.2	84	128.5	0
27		577.3	447	22.6	386.7	305	21.1	190.7	142	25.5
28		578	450	22.1	428	373	12.9	150	77	48.7

FUENTE: Elaboración propia