



Universidad **Mariana**

Desempeño de un reactor UASB en condiciones psicrófilicas en el tratamiento del agua residual
urbana de Pasto

Jojoa Azza Camilo Andrés

Potosí Paz Karen Yulieth

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto
2024

Desempeño de un reactor UASB en condiciones psicrófilicas en el tratamiento del agua residual
urbana de Pasto

Jojoa Azza Camilo Andrés
Potosí Paz Karen Yulieth

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Ambiental

Asesor

Jennifer Jiménez Paz, Ing. Química PhD

Co-asesor

Mg. Gloria Lucia Cárdenas

Co-asesor

Mg. Paola Andrea Ortega Guerrero

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
San Juan de Pasto
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Agradecimientos

En primer lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento a la asesora de tesis, Mg Gloria Cardenas por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida. Asimismo, agradecemos a la docente de metodología Margarita Portilla por su apoyo personal y humano, con quien hemos compartido durante estos años. Gracias por su amabilidad para facilitar sus conocimientos, su tiempo y sus ideas. Por su orientación y atención a las consultas sobre metodología. Agradecemos a la Universidad Mariana, por el material facilitado y las sugerencias recibidas. Finalmente, gracias a nuestros jurados, por la revisión cuidadosa que ha realizado de este texto y sus valiosas sugerencias en momentos de duda. Pero un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionales. Gracias a nuestra familia, amigos y compañeros que siempre nos han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo. sobre todo, por su paciencia, comprensión y solidaridad con este proyecto, por el tiempo que han concedido. A todos, muchas gracias.

Dedicatoria

A Dios quien ha sido guía, fortaleza y su mano de fidelidad y amor han estado hasta el día de hoy. familiares quienes con su amor, paciencia y esfuerzo han permitido que se llegue a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades porque Dios está siempre. A todos los docentes por sus enseñanzas, consejos y palabras de aliento que de una u otra forma hacen parte de este proyecto. Finalmente, a la docente Gloria Cárdenas. por su apoyo y confianza para la realización de esta tesis.

Contenido

Introducción	11
1. Resumen del proyecto	13
1.1 Problema de la investigación.....	14
1.1.1 Descripción y formulación del problema	14
1.2 Justificación.....	16
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos	19
1.4.1 Antecedentes	19
1.4.1.1 Internacionales.....	19
1.4.1.2 Nacionales	20
1.4.1.3 Regionales.	21
1.4.2 Marco teórico	22
1.4.3 Marco conceptual	23
1.4.4 Marco contextual.....	25
1.4.5 Marco legal.....	27
1.5 Metodología	27
1.5.1 Paradigma de investigación.....	27
1.5.2 Enfoque de investigación	27
1.5.3 Tipo de investigación	27
1.5.4 Diseño metodológico.....	28
1.5.5 Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis.....	29
1.5.6 Técnica e instrumentos de recolección de información	30
1.5.7 Preparación agua residual sintética urbana	31
1.5.8 Cálculos de eficiencia de remoción.....	33
2. Presentación de resultados.....	34
2.1 Caracterización de aguas residuales	34
2.2 Preparación agua residual sintética	35

2.3 Acondicionamiento del inóculo.....	36
2.3.1 Aclimatación de lodos.....	36
2.3.2 Determinación de las cantidades de inóculo y agua residual urbana	41
2.3.3 Condiciones de arranque, control y seguimiento	42
2.4 Influencia del tiempo de retención hidráulica (TRH) en la reducción de carga orgánica en el reactor UASB operado bajo condiciones estables y psicrófilicas	42
2.4.1 Operación con un TRH de 1,1 d.....	50
2.5 Análisis estadístico	59
2.5.1 Análisis descriptivo	61
3. Conclusiones	66
4. Recomendaciones.....	68
Anexos.....	75

Índice de Tablas

Tabla 1. Diseño metodológico	28
Tabla 2. Naturaleza del colector.....	29
Tabla 3. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos	31
Tabla 4. Parámetros de medición	31
Tabla 5. Preparación agua residual alimentación del reactor	32
Tabla 6. Caracterización de agua en cada colector	34
Tabla 7. Preparación del agua residual, aclimatación de lodos, alimentación	35
Tabla 8. Aclimatación de lodos.....	37
Tabla 9. Resultados obtenidos aclimatación DQO.....	37
Tabla 10. Temperatura	40
Tabla 11. Análisis estadístico de parámetros en el efluente.....	61

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa ubicación ciudad de Pasto.....	26
Figura 2. Lugar de acondicionamiento.....	36
Figura 3. Periodo aclimatación pH.....	39
Figura 4. Montaje reactor UASB	41
Figura 5. Temperatura en la operación con un TRH de 2.2	43
Figura 6. pH en la operación con un TRH de 2.2.....	44
Figura 7. Alcalinidad TRH 2,2.....	45
Figura 8. ALCB en la operación con un TRH de 2,2.....	46
Figura 9. Acidez con TRH 2,2	47
Figura 10. DQO para un TRH de 2,2	48
Figura 11. Resultados de porcentaje de remoción para un TRH de 2,2	49
Figura 12. pH en la operación con un TRH de 1,1.....	51
Figura 13. Alcalinidad TRH 1,1	52
Figura 14. ALCB con THR 1,1	54
Figura 15. Temperatura con TRH 1,1	55
Figura 16. Acidez con TRH 1,1	56
Figura 17. DQO con TRH 1,1 días.....	57
Figura 18. Resultados de porcentaje de remoción con TRH 1,1 días	58

Índice de anexos

Anexo A. Presupuesto	75
----------------------------	----

Introducción

En Colombia, las aguas residuales provienen de diversas fuentes, principalmente de industrias y áreas urbanas, generando una carga significativa de aguas residuales que requieren tratamientos específicos. Es importante resaltar que el país cuenta con casi 50 millones de habitantes, y muchas áreas, especialmente en zonas rurales, carecen de sistemas adecuados de tratamiento de aguas residuales, generando riesgo a la salud pública y el medio ambiente (Fibras y Normas de Colombia S.A.S. s.f).

Un ejemplo representativo de esta problemática se encuentra en San Juan de Pasto, la capital del departamento de Nariño, ubicado en el suroccidente de Colombia, en la región Andina. La falta de estrategias de tratamiento de aguas residuales domésticas expone a la población y al entorno a riesgos ambientales y de salud (Cooconariño. s.f).

Por otro lado, las aguas residuales domésticas contienen una variedad de contaminantes, incluyendo materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos, que representan un riesgo potencial para la salud pública y el medio ambiente si no se tratan adecuadamente (Montero-Vega, et al. 2020). Entre las tecnologías de tratamiento más utilizadas se encuentran los sistemas biológicos, que emplean microorganismos para degradar los contaminantes presentes en el agua. Dentro de estas tecnologías el Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB), ha demostrado ser una opción eficaz para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, existe una necesidad de evaluar su desempeño bajo condiciones psicrófilas, es decir, en entornos con temperaturas frías, para determinar su viabilidad en ciudades que enfrentan este tipo de clima (Hudayah, et al. 2021).

Ante esta problemática, surgió la necesidad de investigar y desarrollar sistemas de tratamiento eficientes y adaptados a las condiciones locales. Por lo anterior, la presente investigación estudió el desempeño de sistema de tratamiento secundario para aguas residuales urbanas con una condición de temperatura característica de la ciudad de Pasto, en la que se propuso utilizar el UASB, aplicado a la remoción de materia orgánica.

En términos generales, a lo largo del presente documento se presenta una revisión de literatura relevante sobre el tratamiento de aguas residuales domésticas, con un enfoque especial en las tecnologías de tratamiento biológico y el uso del reactor UASB en condiciones de bajas temperaturas. Además, se describen los métodos utilizados para llevar a cabo el estudio, así como los principales resultados obtenidos. Con el sistema diseñado a escala piloto, se evaluó la mejor eficiencia de remoción de materia orgánica, para un tiempo de retención hidráulico (TRH) y un caudal de circulación que se obtuvo experimentalmente. Se trabajó con un rango de temperatura de agua residual de 10°C y 19°C. La presente investigación estuvo dirigida a localidades ubicadas en lugares con condiciones de clima y altitud similares a la ciudad de Pasto, en el que se evaluó la efectividad y desempeño del diseño.

1. Resumen del proyecto

El proyecto propuso evaluar la eficiencia de un reactor UASB en condiciones psicrófilas, específicamente en la ciudad de Pasto, mediante la implementación de dos tiempos de retención hidráulica (TRH) distintos: 2.2 días y 1.1 días, con variaciones en el caudal. Se analizaron en detalle parámetros críticos como pH, acidez y alcalinidad, con el fin de comprender la dinámica del sistema.

Los resultados obtenidos revelaron una eficiencia de remoción significativamente superior en el TRH de 2.2 días, aproximadamente del 70%, en comparación con el TRH de 1.1 días, que demostró una eficiencia de aproximadamente el 40%. Esta disparidad podría atribuirse a la prolongada permanencia del agua en el reactor durante el TRH más extenso, lo que favoreció una mayor actividad biológica y, por ende, una degradación más efectiva de la carga orgánica.

Los análisis detallados de parámetros clave indicaron una acidificación gradual del medio, reflejada en la disminución progresiva del pH. Este fenómeno, junto con la relación observada entre acidez, alcalinidad y eficiencia de remoción, sugiere una influencia directa de factores biológicos y químicos en el rendimiento del reactor. El TRH más largo permitió una mayor producción de ácidos orgánicos, respaldando la hipótesis de una actividad biológica más intensa.

En términos de lo esperado de un reactor UASB, estos resultados indican que el rendimiento del sistema está directamente vinculado a la duración del TRH. La mayor eficiencia en condiciones más prolongadas señala la importancia de ajustar parámetros operativos para optimizar la tecnología en entornos con temperaturas más bajas. Este proyecto no solo contribuye al conocimiento de la viabilidad del reactor UASB en climas fríos, sino que también subraya la necesidad de adaptación específica a condiciones locales para alcanzar su máxima eficacia en la remoción de contaminantes orgánicos.

1.1 Problema de la investigación

1.1.1 Descripción y formulación del problema

La preservación de los sistemas hídricos y de la calidad de sus aguas es una constante preocupación para los investigadores que buscan mitigar las consecuencias de la acción humana sobre el medio ambiente. La multiplicidad de usos de los recursos hídricos, asociada a una característica de recurso natural renovable y también finito, define un escenario que refleja una gran complejidad de relaciones para su preservación (Coorponariño, 2020).

El desarrollo del ser humano requiere que el agua y los sistemas de saneamiento se lleven a cabo de forma separada. Ambos son vitales para reducir el número de enfermedades y para mejorar la salud, la educación y la productividad económica de las poblaciones (ONU. s.f).

Algunas de las afectaciones por el no tratamiento de aguas residuales se desencadenan en la presencia de organismos patógenos, provenientes en su mayoría del tracto intestinal, la cual hace que estas aguas sean consideradas como extremadamente peligrosas, sobre todo al ser descargadas en la superficie de la tierra, subsuelo o en cuerpos de agua (Loaiza, 2022). Lo anterior, es el caso de la presencia de bacterias del grupo entérico que producen enfermedades de origen hídrico como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, cólera, entre otras. Entre las principales enfermedades causadas por virus presentes en las aguas residuales están: poliomielitis, hepatitis infecciosa, entre otras, y la presencia de microorganismos producen enfermedades como disentería amebiana, bilharziasis, entre otras. En cuanto a elementos dañinos de las aguas residuales, se encuentran, malos olores, acciones tóxicas, potencialidad infectiva, polución térmica (ONU. s.f).

Por otro lado, en Colombia la problemática asociada a las aguas residuales se caracteriza por su naturaleza multifacética, con diversas fuentes de origen que engloban tanto el sector industrial como el urbano. La magnitud de la generación anual de agua residual en el país es considerable, evidenciando así la envergadura del desafío que conlleva su tratamiento y gestión adecuados. En particular, la ciudad de Pasto se enfrenta a un flujo significativo de aguas residuales, lo que resalta la imperiosa necesidad de abordar este problema de manera efectiva y sostenible.

Para hacer frente a esta problemática, es crucial implementar estrategias integrales que comprendan desde la mejora de la infraestructura de tratamiento hasta la promoción de prácticas de gestión sostenible del agua. Esto implica la adopción de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales, como sistemas de tratamiento biológico o físico-químico, así como la implementación de programas de monitoreo y control para garantizar la calidad del agua tratada. Además, es fundamental promover la concienciación pública sobre la importancia de la conservación del agua y fomentar la participación de la comunidad en la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles. Solo mediante un enfoque integral y colaborativo será posible enfrentar de manera efectiva el desafío de las aguas residuales en Colombia, asegurando así un uso responsable y sostenible de este recurso vital (Ríos, 2023).

Mantener un tratamiento biológico a temperaturas superiores a los 20°C en una ciudad como Pasto, caracterizada por un clima frío, implica una serie de desafíos adicionales. Además de los requisitos técnicos específicos para garantizar la eficacia del tratamiento biológico, como la selección de microorganismos adecuados y el diseño de sistemas de control precisos, también se deben considerar los costos asociados. El aumento de la temperatura requerida para el tratamiento biológico puede resultar en un mayor consumo energético, lo que se traduce en costos operativos más elevados. Este aspecto plantea un dilema en términos de sostenibilidad ambiental y económica, que exige un enfoque integral y equilibrado para su abordaje (Fibras y Normas de Colombia S.A.S. 2019).

Según la Agenda 2030 en Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo plantea acciones necesarias para aumentar el porcentaje de aguas residuales urbanas domésticas tratadas de manera segura, pasando de 37,3% en 2015, a 54,3% en 2022. Con respecto a la infraestructura de alcantarillado el objetivo de brindar servicios de saneamiento e higiene adecuados, en los próximos cuatro años, 3.200.000 nuevos usuarios contarán con acceso a soluciones adecuadas para el manejo de aguas residuales, para un total de 45.501.155 personas en 2022.

La ciudad de Pasto no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, por lo que, sectores como: industrial; representado principalmente por empresas de lácteos, minería, moteles, entre otros; las actividades domésticas y similares como colegios, escuelas, hospitales, vierten sus

aguas residuales al río Pasto, contribuyendo al deterioro de la calidad de río. (CORPONARIÑO, 2011). Así mismo, el sector agropecuario, que representa un porcentaje muy alto en las comunidades aledañas a la quebrada Miraflores, vierte las aguas residuales con concentraciones altas de componentes químicos sobre la fuente y son vertidas a la quebrada afectando la calidad del agua sobre el 70% del total de la longitud del cauce, ya que las descargas se producen sobre la parte media y baja de la microcuenca (Santa Cruz, 2019).

Por ello es importante, considerar nuevas técnicas que se permitan aplicar en la ciudad de Pasto, contribuyendo a un adecuado tratamiento de las aguas residuales. resultando beneficioso para la comunidad en cuanto a costo y eficiencia.

1.2 Justificación

La mayor parte de las actividades humanas que utilizan agua, generan aguas residuales. A medida que crece la población la demanda global del agua aumenta, por ello la cantidad de aguas residuales y su nivel de contaminación se encuentran en constante aumento en todo el mundo.

El 80% de las aguas residuales se descargan en el medio ambiente sin tratamiento adecuado (García et al., 2021). Esta práctica ha resultado en una significativa disminución de la calidad del agua potable, afectando negativamente la salud humana, la productividad económica y los ecosistemas. De acuerdo con el Informe Mundial sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos (2017) una mejor gestión de las aguas residuales implica no sólo la reducción de la contaminación en las fuentes, sino también la eliminación de contaminantes de los flujos de aguas residuales, la reutilización de las aguas regeneradas y el manejo de subproductos útiles. Estas acciones generan beneficios que contribuyen al bienestar, a la salud, al desarrollo sostenible y al buen manejo de recursos hídricos, según la Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 que reglamenta el uso de aguas residuales en el país.

En consecuencia, esta resolución es un instrumento valioso en el marco del uso eficiente del agua, y permite fomentar un mayor aprovechamiento de los recursos naturales, bajo el modelo de la economía circular, que promueve el reciclaje, la reducción y la reutilización. La falta de manejo

de las aguas residuales en Colombia está dejando más ríos, quebradas, mares y cuerpos de agua contaminados. Solo el 36% de las aguas residuales en Colombia recibieron tratamientos, según el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2018).

En el mismo orden de ideas, la ciudad de Pasto está dentro de esa gran proporción que no cuenta con ningún tratamiento de sus aguas residuales. Sin embargo, en la región este recurso es utilizado en su mayoría en prácticas como la agricultura, la ganadería y la producción láctea, siendo estas las actividades más comunes en el departamento, a su vez este manejo genera gran cantidad de depósitos de aguas residuales que carecen de un tratamiento adecuado para su disposición final.

La falta de una infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales conlleva a la acumulación de vertidos sin tratar, lo que representa una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud de la población. Esta situación subraya la urgencia de implementar medidas integrales que aborden tanto la recolección como el tratamiento de estos efluentes de manera eficiente y sostenible (Tambo, 2022).

Por otro lado, teniendo en cuenta la norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años), esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por aguas residuales domésticas y 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país.

En este contexto, resulta imperativo promover la inversión en infraestructuras y tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Pasto y sus alrededores. Esto no solo contribuiría a mitigar los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud pública, sino que también abriría oportunidades para la reutilización segura de los recursos hídricos, promoviendo la sostenibilidad en el uso de los recursos naturales.

Por ello, la presente investigación experimental evalúa una alternativa para remover la materia orgánica y sólidos suspendidos totales de aguas residuales domésticas, esta solución se basa en el

uso de un reactor UASB (Reactor de Manto de Lodos Anaerobio de Flujo Ascendente). Entre las ventajas de los reactores UASB se tienen: El diseño del flujo ascendente en un reactor UASB mejora el contacto entre la materia orgánica particulada y los microorganismos, facilitando la hidrólisis, son sistemas compactos, con baja demanda de área, sin necesidad de utilización de un material de soporte, se obtienen niveles de eliminación de DBO/DQO superiores al 80%, bajo costo de operación, elevado concentración del lodo excedente, no necesitando de una unidad de espesamiento de lodo, bajo consumo de energía (Arango y Sanches, 2009). La operación de los reactores UASB se basa en la actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan la materia orgánica y se desarrollan en forma interactiva, formando un lodo biológicamente activo en el reactor. Dichos grupos bacterianos establecen entre sí relaciones simbióticas de alta eficiencia metabólica bajo la forma de gránulos cuya densidad les permite sedimentar en el digestor (Giraldo, 1993).

La efectividad de este reactor se evalúa teniendo en cuenta las condiciones ambientales específicas de la zona en la que se implementa, es decir bajo condiciones psicrófilas. El objetivo es determinar su eficiencia en la remoción de materia orgánica en términos de DQO. La implementación de este reactor contribuye a la reutilización de las aguas tratadas, lo que representa una nueva forma de gestión de recursos que se alinea con los principios de la economía circular.

La adopción de tecnologías como el reactor UASB puede tener un impacto significativo en la gestión de los recursos hídricos. Al tratar y reutilizar las aguas residuales, no sólo se protege el medio ambiente, sino que también se promueve un uso más sostenible y eficiente de los recursos naturales. Esto es especialmente relevante en un contexto de creciente escasez de agua y presión sobre los recursos naturales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar a escala de laboratorio en condiciones psicrófilas el desempeño de un reactor UASB como alternativa para el tratamiento secundario del agua residual urbana en la ciudad de Pasto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar el comportamiento del reactor UASB en su fase de arranque en términos de eliminación de carga orgánica.
- Determinar la influencia del tiempo de retención hidráulica sobre la reducción de carga orgánica en el reactor UASB operado bajo condiciones estables y psicrófilas.

1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1 Antecedentes

1.4.1.1 Internacionales. Da Silva et al. (2020) investigaron el tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas utilizando un biorreactor de membrana de flujo ascendente (MBR) a escala piloto. El sistema demostró una alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica (DQO) y nutrientes (nitrógeno y fósforo), alcanzando eficiencias superiores al 90% para DQO y 80% para nitrógeno total. La operación a baja temperatura (20°C) no afectó significativamente el rendimiento del tratamiento.

Por otro lado, Smith (2021), aplicó un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales y producción de biogás en zonas altoandinas. El estudio se realizó en condiciones similares a las de Pasto y encontró algunas desventajas durante el proceso. Entre ellas se encuentran: una etapa de inicio muy larga, poco rendimiento en remoción de parámetros biológicos (coliformes totales), químicos (nitrógeno total y fósforo total) y sensibilidad a condiciones psicrófilas (10°C -20°C). Siendo la última desventaja, una característica de las zonas altoandinas. Se estudiaron también tecnologías complementarias que incluyan a los reactores UASB complementados con otros métodos de tratamiento de aguas residuales para la mejora de su rendimiento. Smith (2021), concluyó que es importante tener en cuenta que esta tecnología es principalmente usada para aguas de alta carga orgánica y la remoción de otros parámetros como metales pesados, requerirían de un post-tratamiento. Con respecto al biogás, este tiene el potencial de recircular para generar energía al propio sistema, la producción de metano, componente del biogás aumenta al adicionar un proceso de co-digestión y la generación de lodos estables simplifica su disposición final.

1.4.1.2 Nacionales. Maya González, J. A. (2020) evaluó sistemas biológicos de lecho fijo para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la ciudad de San Juan de Pasto (Nariño). La evaluación desarrollada permitió determinar que el sistema de mayor remoción de materia orgánica expresada en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y sólidos suspendidos totales fue el lombrifiltro con un 56,42% para DBO₅ y 27,3% para Sólidos suspendidos Totales (SST), siendo un referente importante para la elección de un tratamiento terciario basado en tratamiento biológico para tratamiento de aguas residuales domiciliarias.

Orozco, et al. (2014) estudiaron el arranque de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones andinoamazonicas, esta investigación se utilizó como referente durante proceso de arranque debido a la similitud en la metodología. Durante la investigación se implementaron tres tipos de monitoreo para el proceso anaerobio: monitoreo de estabilidad, eficiencia para el sustrato, calidad y cantidad del lodo anaerobio. Se obtuvieron porcentajes de remoción de materia orgánica superiores al 70% y remoción de coliformes tanto totales como fecales de un 24% en el ARD a concentración media y alta de sustrato, como también valores de pH cercanos a la neutralidad y producción de metano.

Torres (2013) estudió las perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo, sirviendo como base para la innovación de nuestra investigación gracias a que dentro de su metodología está avanzar en el mejoramiento y perfeccionamiento de los actuales métodos de tratamiento que permitan soluciones tecnológicas respetuosas con el ambiente y adecuadas a las condiciones socioeconómicas y culturales propias de cada región, al igual que la ayuda para poder llevar a cabo un análisis de las perspectivas que se requieren para la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas –PTARD– apropiadas y sostenibles y plantear un análisis y reflexión sobre el tratamiento anaerobio de ARD en países en desarrollo y sobre las perspectivas de aplicación en pequeña y gran escala.

Álvarez (2003) en su investigación afirma que existen varias formas para la aplicación de digestión anaerobia para el tratamiento de AR y con la cual podemos encontrar la más adecuada para el caso teniendo como base que los resultados obtenidos en la operación de esa investigación fueron un TRH global de 9-10 h y a una temperatura de 18°C, se consiguieron eficacias de

eliminación del 89%, 63% y 62% en SST, DQO y DBO, respectivamente. A temperaturas inferiores, de 14-16°C, con un influente más diluido y a un TRH de 11 h, las eficacias fueron del 86%, 59% y 59% en SST, DQO y DBO, respectivamente, concluyendo que fue la mejor preferencia para el caso.

1.4.1.3 Regionales. Caipe y Moreno (2015), evaluaron comparativamente la hidrodinámica y la eficiencia de remoción de la MO entre un reactor de lecho fijo ascendente anaerobio empacado con bambú y otro reactor con las mismas características de diseño empacado con grava para el tratamiento secundario de ARD, esta investigación tuvo un enfoque correlacional debido a la comparación entre 2 sistemas de tratamiento de ARD, y es de tipo cuantitativa ya que se basa en análisis de pruebas de laboratorio para llegar a una conclusión en el comportamiento real de los sistemas de tratamiento.

El mayor nivel de remoción se lo pudo observar en los reactores empacados con PET con un valor de 25 y 24 mgO₂/L correspondientes a una eficiencia de remoción del 90% mientras que en los filtros empacados con grava la remoción más alta estuvo en el rango de 53 a 56 mg O₂/L correspondiente a una eficiencia del 77% de MO dando como resultado que los FAFAs empacados con PET son la mejor opción en comparación a los filtros de grava para el tratamiento de aguas residuales.

Enríquez y Jurado (2016) analizaron el arranque y estabilización de un biodigestor como un proceso de producción de biogás. El arranque de este biodigestor consistió en el análisis de un proceso de actividad metanogénica específica (AME) sobre tres lodos anaerobios, con el fin de reconocer la capacidad máxima de metano que se puede producir con un tipo de inóculo específico. Concluyeron, según análisis estadísticos, que no hay diferencia en utilizar cualquiera de estos 3 lodos, por lo cual se procedió a elaborar un protocolo de inoculación, teniendo en cuenta el caudal de aguas residuales generadas, los parámetros fisicoquímicos de mezcla entre sustrato e inóculo, y posteriormente, haciendo la medición de la eficiencia del biodigestor con la cantidad y calidad de biogás producido en comparación con la literatura técnica.

Vargas et al (2020), evaluaron los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica, así como la eficiencia de remoción de contaminantes y las alternativas de mejoramiento. Concluyeron que los sistemas biológicos presentan altos porcentajes de eficiencia de remoción de contaminantes, pero cuando estos se emplean en conjunto, obtienen eficiencias porcentuales mayores al 90%, evidenciando que estos sistemas complementados, son óptimos para el tratamiento de aguas residuales domésticas; además que, la reutilización de las aguas residuales es una opción interesante en términos de costos en comparación con otras fuentes de agua existentes: las aguas superficiales, aguas subterráneas o la desalinización.

Adicionalmente, cabe resaltar la viabilidad económica de los sistemas que simulan procesos naturales como: lagunas de estabilización y humedales artificiales, los cuales mostraron la mejor rentabilidad económica, funcional y operacional y que las técnicas de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (ARD), para disminuir las concentraciones de contaminación sobre los cuerpos de agua superficial; para ello se debe empezar con una ampliación de los sistemas actuales de tratamiento de este tipo de vertimientos, mediante el montaje de procesos biológicos.

Maya González, J. A. (2020). Evaluación de sistemas biológicos de lecho fijo para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la ciudad de San Juan de Pasto (Nariño). La evaluación desarrollada permitió determinar que el sistema de mayor remoción de materia orgánica expresada en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y sólidos suspendidos totales fue el lombrifiltro con un 56,42% para DBO_5 y 27,3% para Sólidos suspendidos Totales (SST), siendo un referente importante para la elección de un tratamiento terciario basado en tratamiento biológico para tratamiento de aguas residuales domiciliarias.

1.4.2 Marco teórico

Las aguas residuales son una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos (Ramalho, R. S. 1996), estas aguas son constituidas por materia orgánica en forma suspendida, coloidal y disuelta (Menéndez, et al., 2007), aquellas aguas aparecen formando partes de líquidos cloacales en las cuales se incorporan los restos de lavados domésticos, baños, alimentación, etc (Quispe Pérez, et al., 2020).

1.4.3 Marco conceptual

El análisis de las características físico - químicas del agua es fundamental para evaluar su calidad y su idoneidad para diversos usos. Entre estas características se encuentran el color, el olor, el sabor y la temperatura:

El color del agua puede estar influenciado por diversos factores, como la presencia de metales o iones metálicos en disolución, materia orgánica como el humus o residuos orgánicos, así como la presencia de plancton o desechos industriales. La eliminación del color es un paso crucial para cualquier aplicación del agua, ya que el color anormal puede ser indicativo de contaminación o de la presencia de compuestos no deseados (Beatriz, R. P. (2007)).

El olor del agua es otra característica que puede proporcionar información importante sobre su calidad. Normalmente, el agua pura es inodora, pero la presencia de olores distintos puede ser un indicador de alteraciones en sus componentes, lo que sugiere la posible contaminación del agua (Flores Alés, V. (2015)).

El sabor del agua potable debe ser leve y agradable, indicando su pureza. Sin embargo, el exceso de pureza puede resultar en un sabor menos agradable debido a la menor cantidad de sales minerales. Además, sabores anómalos pueden ser indicativos de contaminación o la presencia de organismos como algas u hongos, lo que requiere una evaluación adicional de su calidad (Flores Alés, V. (2015)).

La temperatura del agua es un factor crítico que influye en su capacidad para sustentar la vida acuática y en su transporte de oxígeno. A temperaturas más bajas, el agua puede transportar más oxígeno, lo que afecta la fotosíntesis de plantas y algas, así como la sensibilidad de los organismos frente a los residuos tóxicos. Por lo tanto, la temperatura del agua es un indicador importante de su capacidad para mantener ecosistemas saludables (Sánchez Vásquez, V. L. (2022)).

Parámetros químicos del agua. El pH es una de las pruebas más comunes para conocer parte de la calidad del agua. El pH indica la acidez o alcalinidad, en este caso de un líquido como es el

agua, pero es en realidad una medida de la actividad del potencial de iones de hidrógeno (H^+). Las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14, con 7.0 considerado neutro. Las soluciones con un pH inferior a 7.0 se consideran ácidas. Las soluciones con un pH por encima de 7.0, hasta 14.0 se consideran bases o alcalinos (PureWater Colombia S.A.S. s.f).

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez (Cárdenas S, R., Isabel, M. (2022)).

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. (Silva Vargas, I. L. (2023). Análisis fisicoquímico del agua en la vereda la lajita Tunja Según Resolución 2115 Del 2007).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (Rodríguez, H. 2007).

La alcalinidad del agua es su capacidad de neutralizar ácidos, y es la suma de todas las bases titulables; el valor medido puede variar significativamente con el pH de punto final empleado (Bojaca, R.P. 2005).

El Oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua. (Sánchez et al., 2010).

Parámetros Biológicos del agua. Coliformes Totales: Es una bacteria de origen fecal que pertenece al grupo de las bacterias coliformes. Es un indicador específico de contaminación fecal en el agua, responsable de gastroenteritis. Su supervivencia en medios no entéricos es limitada, por lo que su presencia indica una contaminación reciente. Pullés, M. R. (2014).

Coliformes Fecales: Su presencia indica que el agua está contaminada con excremento o desechos de alcantarillas, y tiene el potencial de causar enfermedades. *Escherichia coli* es un subgrupo de bacterias fecales coliformes. Pullés, M. R. (2014).

Estrategias y condiciones del tratamiento de aguas residuales. Reactor UASB: Es un Reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodos de alta eficiencia. Normalmente, el reactor UASB es utilizado en procesos primarios para la estabilización de la materia orgánica inicial. (Castro Olarte, J. (2018).

Sistema Anaerobio: Aprovechan la capacidad de determinados microorganismos (entre los que destacan las bacterias) de asimilar la materia orgánica y los nutrientes disueltos en el agua residual a tratar para su propio crecimiento, llevando a cabo la eliminación de componentes solubles en el agua. (Yépez Peralta, M. F., & Quinto Yépez, M. D. (2018).

Condiciones Psicrófilas Se denomina psicrófilos a los organismos capaces de vivir a temperaturas por debajo de los 5 grados centígrados. En su mayor parte, sin embargo, sus temperaturas mínimas de desarrollo van de menos 5 grados a 5 grados centígrados, sus temperaturas óptimas de desarrollo se encuentran entre 12 y 15 grados centígrados y sus temperaturas de desarrollo máximas son de 15 a 20 grados centígrados (W.F. Harrigan. 1998). En estas temperaturas su actividad metabólica es necesaria para asegurar procesos de descomposición de materia orgánica (Fernández Sánchez, M. (2014).

Tiempo de Retención Hidráulico: Es un parámetro que varía de acuerdo al tipo de agua residual a tratar, de la temperatura y del medio ambiente. Se define como el tiempo que tarda una gota de agua en ejecutar el recorrido en el reactor (Escorcía, 2001).

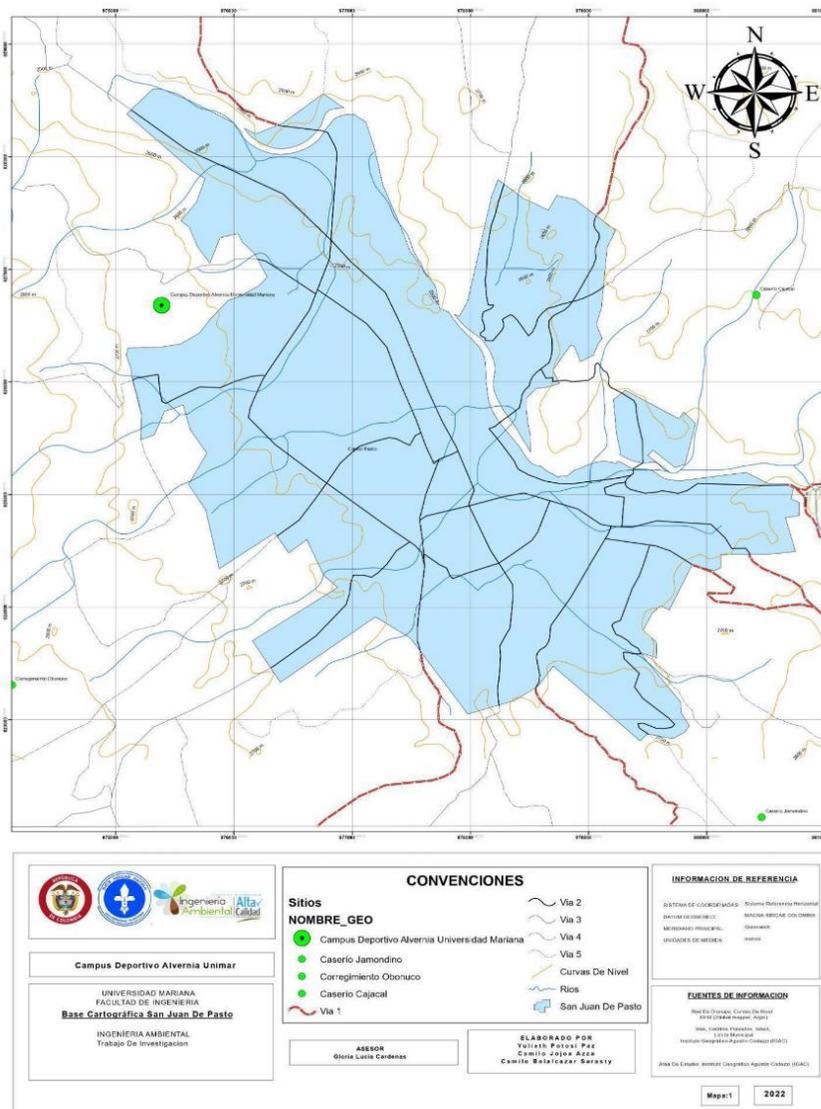
1.4.4 Marco contextual

La presente investigación se realizará en el municipio de Pasto (Figura 1), capital administrativa del departamento de Nariño, ubicado en el centro oriente del departamento, al sur occidente de Colombia. El municipio, político-administrativamente, se divide en 12 comunas y 17

corregimientos, ocupa una superficie de 6.181 kilómetros cuadrados. La cabecera municipal de Pasto se ubica a una altitud de 2.527 metros sobre el nivel del mar, cuenta con una temperatura de 12 °C. De acuerdo con las proyecciones del censo de población y vivienda del DANE-2018, para 2020 se cuenta con 392.589 habitantes, de los cuales 185.141 son hombres (47,15%) y 207.448 son mujeres (52,84%).

Figura 1

Mapa ubicación ciudad de Pasto



1.4.5 Marco legal

Resolución 1256 del 23 de noviembre de 2021 que reglamenta el uso de aguas residuales en el país. Esta resolución es un instrumento valioso en el marco del uso eficiente del agua, y permite fomentar un mayor aprovechamiento de los recursos naturales, bajo el modelo de la economía circular, que promueve el reciclaje, la reducción y la reutilización. Teniendo en cuenta la norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años), esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por aguas residuales domésticas y 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país.

1.5 Metodología

1.5.1 Paradigma de investigación

Se enmarca en el paradigma de investigación de la ingeniería ambiental, específicamente en el área de tratamiento de aguas residuales. Se aborda la problemática de la remoción de materia orgánica a través de la aplicación de un reactor UASB (reactor manto de lodos anaerobio de flujo ascendente). Este paradigma busca comprender y aplicar soluciones tecnológicas innovadoras para mejorar el tratamiento de aguas residuales, con un enfoque en la sostenibilidad.

1.5.2 Enfoque de investigación

El enfoque de la investigación es mixto, ya que se analizaron resultados tanto cualitativos como cuantitativos de las muestras a tomar. Teniendo en cuenta parámetros de calidad del agua.

1.5.3 Tipo de investigación

Investigación experimental, evaluativa. Ya que se va a analizar una estrategia viable para el tratamiento de aguas residuales urbanas en Pasto.

1.5.4 Diseño metodológico

Se planteó el diseño metodológico que se muestra en la Tabla 1 para alcanzar con los objetivos específicos planteados.

Tabla 1

Diseño metodológico

Objetivos específicos	Metas	Actividad	Producto
Analizar el comportamiento del reactor UASB en su fase de arranque en términos de eliminación de carga orgánica	Lograr las condiciones óptimas para el arranque del reactor con aguas residuales sintéticas con condiciones psicófilas	<ul style="list-style-type: none"> ● Estimar las características del agua residual a la salida de un tratamiento primario. ● Preparar el agua residual sintética urbana. ● Acondicionar el inóculo. ● Determinar las cantidades de inóculo y agua residual urbana para inocular el reactor. ● Establecer las condiciones de arranque, control y seguimiento. 	Eficiencia de remoción de carga orgánica (DQO)
Determinar la influencia del tiempo de retención hidráulica en reducción de carga orgánica del reactor UASB operado en condiciones estables y psicófilas	Obtener un porcentaje de eficiencia del 70% en eliminación de carga orgánica	<ul style="list-style-type: none"> ● Definir el diseño experimental. ● Determinar los 2 niveles del factor TRH. ● Realizar la operación del reactor para cada nivel. ● Realizar análisis de resultados. 	Análisis fisicoquímicos del efluente
Elaboración informe final			

1.5.5 Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis

La investigación se realizó en la ciudad de Pasto la cual cuenta con cinco colectores principales de aguas residuales que conducen su vertimiento directamente sobre el río Pasto, recolectando aguas residuales, comerciales y mayoritariamente aguas domiciliarias. Los cinco colectores de aguas residuales son:

Box coulvert Hospital Departamental, donde se drena el canal de la quebrada Chapal y recibe la descarga de colectores del sector suroriente de la ciudad.

Colector Circular Colegio Pedagógico, este es el punto de descarga del colector Aranda de tipo combinado, que transporta aguas residuales domésticas de este sector y caudales con aguas sanitarias de los asentamientos de la zona de influencia.

Box coulvert Colegio Pedagógico, en este punto se descargan las aguas del colector Aranda, drenando los caudales de las quebradas Blanca, Aranda y Gallinacera.

Colector circular Juan XXIII, en este punto es donde se descarga el interceptor lateral izquierdo del río Pasto.

Colector circular club de tenis, este es el punto de salida de la ciudad, dispone de aguas provenientes de barrios como las quintas de San Pedro, Figueroa, Los Laureles, etc.

Tabla 2

Naturaleza del colector

Colector	Ducto	Dirección	Coordenadas	Tipo
Hospital Departamental	Boxcoulvert	Cr9 CII2	N 625175 E 978750	Combinado
Colector circular colegio pedagógico	Boxcoulvert	Cr26 CII22B	N 626400 E 976090	Sanitario

Box coulvert colegio pedagógico	Colector	Cr26 CII22B	N 626395 E 978060	Combinado
Juan XXIII	Interceptor	Cr45 CII19	N 628100 E 976415	Combinado
Club tenis	Interceptor	Cr46 CII18	N 627970 E 976222	Sanitario

Con el objetivo de seleccionar el punto de muestreo más adecuado para realizar el seguimiento, se presenta en la Tabla 2 el tipo de colector y su correspondiente georreferenciación. En la tabla mencionada se establecen los posibles tipos de colectores donde se puede tomar la muestra para la puesta en marcha del montaje, debido a los sistemas de alcantarillado sanitarios, son aquellos donde se evacuan aguas residuales de tipo doméstico, para el caso de los alcantarillados combinados se evacuan aguas residuales domiciliarias más aguas residuales pluviales (Jiménez, 2009), de esta manera se perfiló como objeto de análisis y toma de muestra el *Colector Circular del Colegio Pedagógico y colector ubicado en la zona de Club de tenis al norte de la ciudad*.

1.5.6 Técnica e instrumentos de recolección de información

Para la preparación del agua residual sintética se buscó información secundaria y se procedió a la caracterización y pruebas experimentales. Se trabajaron con las siguientes variables:

Variable dependiente: Porcentaje de remoción de materia orgánica (DQO).

Variables independientes: Tiempo de retención hidráulico

Variables de seguimiento y control: Temperatura, caudal, pH, DBO, DQO, Alcalinidad.

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales sintéticas se siguieron los métodos estandarizados que se describen en la Tabla 3.

Tabla 3*Caracterización de los parámetros fisicoquímicos*

Parámetro Fisicoquímico	Método	Referencia
Temperatura	Electrométrica	SM 4500-H+B
Caudal	volumétrico	$Q = V/t$ (ml/min)
pH	Electrométrica	SM 4500- H+B
DBO	Electrométrica	SM 5210B, ASTM D 888-12
DQO	Colorimétrico	SM 5220 D
Turbidez	fotométrico	SM 2130 B

Para la toma de las muestras y el respectivo análisis se tuvo en consideración la frecuencia que se indica en la tabla 4. La toma de muestras se realizó hasta alcanzar un 70% de eficiencia de remoción de DQO.

Tabla 4*Parámetros de medición*

Análisis	Matriz	Frecuencia	No. Muestras por grupo
pH	Agua sobrenadante		1
Temperatura	Agua sobrenadante	2 veces por semana (martes y viernes)	1
DQO filtrada	Agua sobrenadante		1

1.5.7 Preparación agua residual sintética urbana

La evaluación del desempeño del reactor UASB se realizó utilizando un agua residual sintética que cumpliera con las características similares al agua residual doméstica vertida sobre el sector del Colector circular club de tenis. Dado que no existe un método específico para la obtención de estas

aguas residuales sintéticas, se toma lo expuesto por Torres, et al (1996), utilizando los componentes descritos en la Tabla 5.

Tabla 5

Preparación agua residual alimentación del reactor

Componente	Cantidad (mg/l)	Cantidad para 20 l (g/l)
Gelatina	170	3,4
Glucosa	930	18,76
Leche en polvo	510	10,2
Sulfato de Magnesio $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	15	1,8
Fosfato di ácido KH_2PO_4	223	4,46
Sulfato de Amonio $(NH_4)_2SO_4$	371	7,42
Bicarbonato de Sodio $NaHCO_3$	750	15

Fuente: Rodríguez y Lozano-Rivas (2012)

Con el objetivo de producir un agua residual sintética que cumpla con las características propias del vertimiento fue necesario realizar cálculos estequiométricos de concentraciones de cada elemento y calcular los volúmenes de cada uno para producir 20 l de agua residual. Los cálculos se hicieron con base a la DQO y cantidad de sólidos suspendidos presentes, para lo cual se realizaron mezclas varios días de la semana, teniendo en cuenta factores climáticos hasta que ésta no varíe y se obtenga una mezcla constante. Para obtener el aporte individual de la DQO de cada componente, se prepararon diferentes soluciones a partir de los componentes puros y se realizó la medición de la DQO a cada una.

Es importante aclarar que falta hacer el estudio previo del agua residual comparado con los parámetros de la ciudad de pasto ya que esta se realizó en base a lo teórico. El procedimiento llevado a cabo para la preparación del agua residual sintética urbana fue el siguiente:

Se prepararon soluciones concentradas (en términos de DQO) de cada uno de los componentes orgánicos seleccionados, en volúmenes de 1.0 l.

Cada solución (con excepción de la sacarosa pues normalmente los azúcares son consumidos crudos) fue hervida durante 2 h, para garantizar la completa disolución de los compuestos orgánicos y evitar la formación de grumos, principalmente en las soluciones más propensas a ello (almidón y celulosa).

En la solución de aceite, una vez fría, se adicionaron unas gotas de detergente líquido, con el objetivo de emulsionar las grasas y porque el detergente es un componente normal en ARD.

Después de frías, las soluciones preparadas fueron caracterizadas en términos de concentración de DQO, con el objetivo de conocer las alícuotas que debían ser tomadas de cada solución para la preparación del sustrato sintético.

Adicionados los respectivos volúmenes de soluciones orgánicas para garantizar la DQO del sustrato sintético.

La alcalinidad y el pH fueron corregidos con bicarbonato de sodio.

1.5.8 Cálculos de eficiencia de remoción

Para obtener una eficiencia de remoción de DQO se aplicó la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$\text{Eficiencia de remoción} = \frac{DQO \text{ inicial} - DQO \text{ final}}{\text{Inicial}} * 100$$

La DQO inicial es la DQO del agua residual sintética y la DQO final es la DQO del agua sobrenadante en cada día.

2. Presentación de resultados

2.1 Caracterización de aguas residuales

La caracterización de las aguas residuales se realizó mediante fuentes secundarias, es así como Empopasto S.A ESP en el PSMV de San Juan de Pasto, presenta una caracterización realizada en cada colector para los parámetros de DBO y SST los cuales se pueden apreciar a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6

Caracterización de agua en cada colector

Caracterización de agua residual	Box Coulvert H. Departamental	Colegio Pedagógico Box Coulvert	Circular Colegio Pedagógico	Juan XII	Club tenis	
Tipo de alcantarillado	Combinado	Combinado	Sanitario	Combinado	Sanitario	
DBO (mg/l)	Valor máximo	292,5	165	528	405	338
	Valor mínimo	24,6	17,3	126	80,3	65
	Valor promedio	143,9	65,7	322,8	235,9	152,6
ST (mg/l)	Valor máximo	2018	1128	1624	1328	1587,5
	Valor mínimo	213	173	312,5	220	131
	Valor promedio	497,3	338,2	699,8	567,1	677,5

Fuente: Empopasto (2011)

Los anteriores datos son suministrados tras el análisis histórico de 40 datos obtenidos entre el periodo de tiempo de 2004 y 2009 de los colectores, para ello es necesario tener en cuenta que según la literatura un agua residual típica tiene concentraciones de DBO de 220 mg/l y ST de 720 mg/l (Romero Rojas, 2000).

2.2 Preparación agua residual sintética

Muestra. Para este caso se tomó agua sintética con características fisicoquímicas similares a la población.

Se realizaron los cálculos teniendo en cuenta las referencias indicadas en la metodología y se preparó un agua residual sintética bajo las condiciones requeridas dependiendo del volumen de agua residual sintética, los resultados se pueden observar en la Tabla 7:

Tabla 7

Preparación del agua residual, aclimatación de lodos, alimentación

Componente	Concentración del componente (mg/l)	Cantidad de componente para 20l de agua ARS (g)	Cantidad de componente para 3l de agua ARS (g)	Cantidad de componente para 4l de agua ARS (g)
Gelatina sin sabor	170	3,4	1,36	0,68
Leche en polvo	510	10,2	4,08	2,04
Glucosa	938	18,76	7,5	3,75
Sulfato de Magnesio (MgSO ₄ .7H ₂ O)	15	0,3	0,12	0,06
Fosfato ácido de Potasio (KH ₂ PO ₄)	223	4,46	1,78	0,89
Sulfato de amonio ((NH ₄) ₂ SO ₄)	371	7,42	2,92	1,48
Bicarbonato de sodio (NaHCO ₃)	750	15	6,0	3,0

Fuente: Rodríguez y Lozano-Rivas (2012).

2.3 Acondicionamiento del inóculo

2.3.1 Aclimatación de lodos

Para el proceso de aclimatación de lodos primero se estableció la cantidad de lodo a utilizar en el reactor. La cantidad de lodo determinada para el reactor fue de 20 litros. El lodo se adquirió de la planta de tratamiento de Postobón. Después de adquirir el lodo, se llevó al lugar de estudio en los laboratorios ubicados en la sede Alvernia y se dispuso en baldes.

Figura 2

Lugar de acondicionamiento



Con el propósito de que los lodos no adquirieran demasiada oxigenación durante el proceso de aclimatación se alimentó como se muestra en la Tabla 8. Se establecieron los días de alimentación y la cantidad de agua residual sintética a aplicar.

Tabla 8*Aclimatación de lodos*

Lodo	Cantidad de lodo(L)	Cantidad de agua residual sintética(L) a ajustar los martes y viernes
Lodo anaerobio para reactor UASB	20	8

En el transcurso de los días se analizó el DQO del agua de entrada y se estableció el valor de DQO teórico, en este caso el mayor en aguas residuales es de 500 mg/l (Lozano, 2012). En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en el transcurso del mes de aclimatación de lodos, obteniendo un máximo de DQO en el agua residual de 576 mg/l y un mínimo de 320 mg/l.

Tabla 9*Resultados obtenidos aclimatación DQO*

Contenido DQO, mg. L ⁻¹		Remoción %	Días transcurridos
ARS	Sobrenadante		
398	179	67,84	0
320	143,4	64,69	4
448	191,3	57,14	6
512	190,5	75,00	11

385	127,5	66,75	14
576	189,6	67,71	18
512	164,9	44,53	21
432	137	68,75	25
431	129,8	69,14	28

Los valores de DQO en el sobrenadante son menores en todos los casos posiblemente debido a que los lodos se ajustan a la composición del agua residual, desarrollando una comunidad microbiana especializada en degradar la materia orgánica presente. Esta comunidad puede volverse más eficiente con el tiempo, consumiendo una mayor cantidad de DQO del agua residual. El proceso de aclimatación se mantuvo hasta obtener un porcentaje estable de remoción de 70%, el cual se alcanzó transcurridos 28 días. Alcanzado el porcentaje de remoción establecido, se continuó con el arranque del reactor y evaluación de desempeño de este. El proceso realizado de aclimatación de lodos optimiza la eficiencia de la comunidad microbiana, reduciendo el DQO del agua residual y asegurando un tratamiento eficaz.

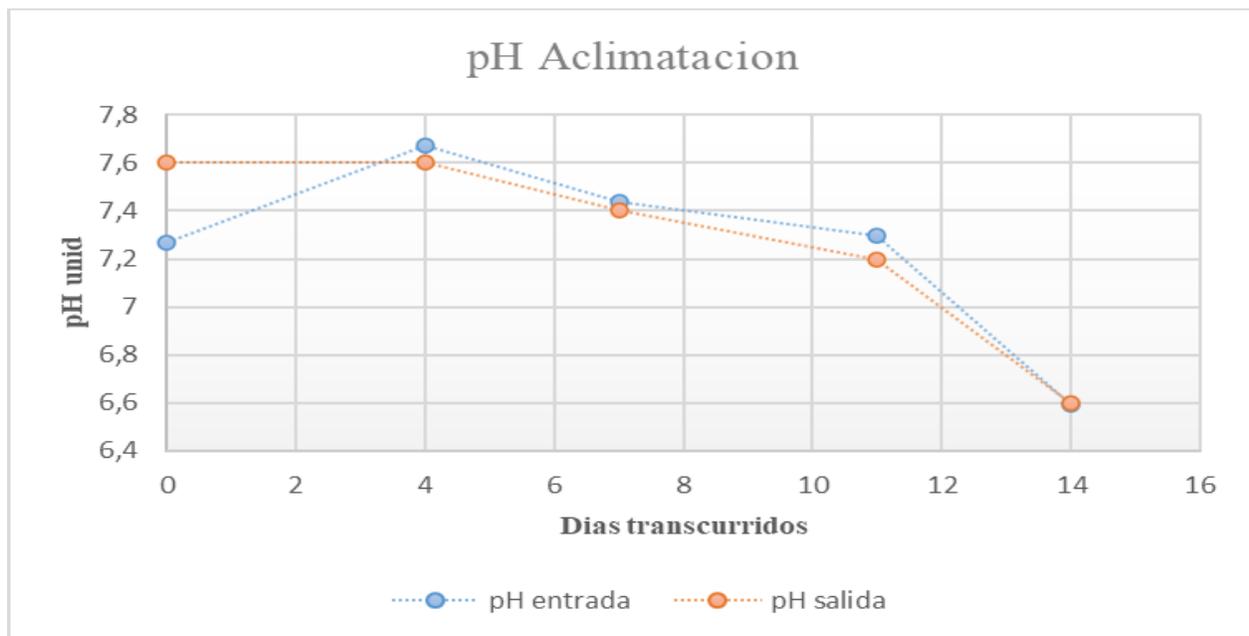
Por otro lado, en la tabla 9 se puede evidenciar que existe una variabilidad en los porcentajes de remoción de DQO y que estos valores oscilan entre el 55% y el 69.9%, lo cual sugiere posibles adaptaciones o mejoras implementadas en el sistema. Se destaca especialmente un aumento significativo en la remoción de DQO en un período de 28 días, lo que podría atribuirse a eventos operativos particulares o condiciones excepcionales que han impactado positivamente en el proceso de tratamiento. Estos resultados subrayan la necesidad de optimizar las condiciones operativas con el fin de incrementar la consistencia y eficacia del tratamiento, lo cual se traducirá en un mejor desempeño del sistema en términos de remoción de contaminantes. Se concluyó que era fundamental continuar monitoreando y evaluando el sistema para identificar oportunidades de mejora y asegurar un funcionamiento óptimo a largo plazo.

Monitoreo de pH. Además de las mediciones de DQO, se hizo un monitoreo del pH de la muestra. En la figura 3 se observa las condiciones iniciales del agua a tratar y los cambios que

ocurren a lo largo del proceso de aclimatación. En general, el pH del agua se encuentra oscilando entre 7,2 y un máximo de 7,7 lo que indica que el agua tiende a ser ligeramente alcalina esto debido al componente como lo es, el bicarbonato (HCO_3^-) este vuelve el agua alcalina porque actúa como un agente neutralizante de ácidos. Cuando se disuelve, el bicarbonato neutraliza los protones (H^+), reduciendo la acidez del agua y elevando su pH. Además, funciona como un buffer, ayudando a mantener el pH estable frente a cambios en la concentración de ácidos o bases, lo que es esencial para la estabilidad química en sistemas acuáticos y el tratamiento de aguas residuales.

Figura 3

Periodo aclimatación pH



Basándonos en los datos recopilados durante el proceso de aclimatación, observamos una tendencia hacia un ambiente más neutro por parte de los microorganismos. Este cambio se vincula directamente con la presencia de materia orgánica en los lodos, evidenciando una disminución significativa en su concentración. Este descenso puede interpretarse como una respuesta adaptativa de los microorganismos al nuevo entorno, posiblemente influenciado por el cambio de temperatura experimentado durante el proceso de aclimatación. Este fenómeno sugiere una capacidad de ajuste

y una posible optimización de las condiciones del sistema para favorecer la actividad microbiana, aspecto crucial en procesos de tratamiento de aguas residuales.

Monitoreo de temperatura. Se realizó una medición continua de la temperatura durante el periodo de aclimatación. Según los datos obtenidos, los microorganismos lograron adaptarse a una temperatura mínima de 16°C y un máximo de 18°C, según los datos reflejados en la Tabla 10.

Tabla 10

Temperatura

Días	Temp. (°C)
0	17,2
4	16,3
4	16,3
7	18,3
7	18,3
11	16,2
11	16,2
14	16,8
14	16,8
Promedio	16,9

Esta adaptación a los rangos de temperatura específicos puede deberse a la producción de enzimas estables a temperaturas bajas, implicando una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos en los microorganismos. Estudios han demostrado que los microorganismos psicrófilos pueden formar consorcios microbianos adaptados a condiciones psicrófilas, lo que favorece la estabilidad de la digestión anaerobia y la producción de biogás en reactores UASB operados a temperaturas bajas (Jaimes-Estévez et al., 2020). Los resultados obtenidos dan un indicio de que este sistema

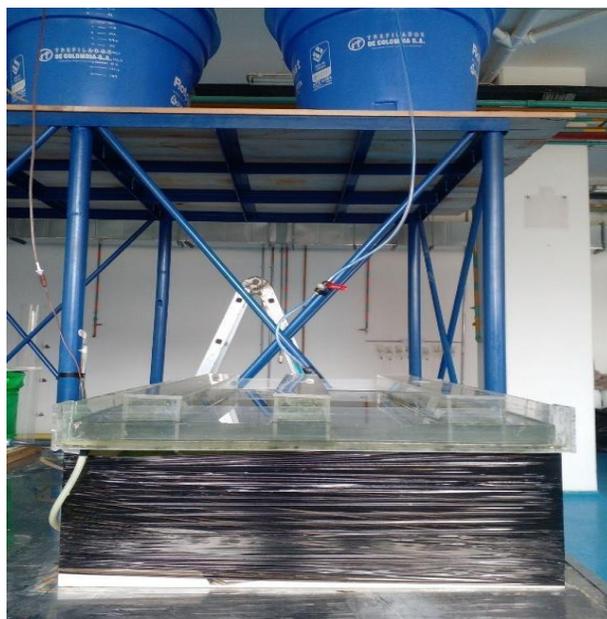
puede ser una alternativa viable para la degradación de materia orgánica bajo condiciones psicrófilas.

2.3.2 Determinación de las cantidades de inóculo y agua residual urbana

Fue necesario tener en cuenta el volumen total del reactor. Este dato se tomó de la tesis que precede al presente estudio titulada “*Implementación y evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor UASB a escala de laboratorio en la ciudad de Pasto, Nariño* (Paz et al., 2021)” quienes al construir el reactor sugieren tomar un 30 % de lodo, del volumen total del reactor para tener una mayor eficiencia en el porcentaje de remoción, según el análisis realizado en el estudio. El volumen total del reactor es de 96 litros y el 30% de este haciendo los respectivos cálculos es 28.8 litros que corresponden al lodo. La cantidad de agua residual necesaria para inocular el reactor fue de 68 litros los que se encontraban en constante flujo a través del reactor. El reactor se alimentó por un tanque de almacenamiento que se llenó hasta 180 litros de agua residual el cuál debía estar en constante abastecimiento y para ello se llenó cada tres días, ubicado en la parte superior a 2 metros de altura el cual lleva un flujo que se estabilizó a un caudal de 30 ml/min (ver Figura 4).

Figura 4

Montaje reactor UASB



2.3.3 Condiciones de arranque, control y seguimiento

Se depositó el lodo aclimatado dentro del reactor, hasta una altura de 30 cm, seguidamente se abrió el flujo de agua residual sintética que entra por la parte baja del reactor con un caudal de 30 ml/min, estas condiciones del caudal para el arranque se establecieron según el trabajo de grado de Paz (2021) la cual sugiere que a un caudal de 80 ml/min.

Se obtiene una buena eficiencia del reactor UASB, por lo cual se decide que el caudal para la etapa de arranque del reactor sería de 30 ml/min, como promedio. esperando una remoción del 60% al 80% haciendo un permanente monitoreo de parámetros como DQO, temperatura, medición potenciométrica del pH con el fin de que este se mantenga neutro entre 6.8 y 7.5 y estable para que no hubiese una caída del pH y con esto una reducción en la eficiencia del sistema.

2.4 Influencia del tiempo de retención hidráulica (TRH) en la reducción de carga orgánica en el reactor UASB operado bajo condiciones estables y psicrófilicas

2.4.1. Operación con un TRH de 2.2 d.

Al lograr un pH estable durante la fase de aclimatación se procedió a aplicar el primer TRH, el cual se estableció en 2.2 días. Este valor de TRH se calculó a partir de la relación V/Q , donde V representa el volumen total del reactor, que en este caso es de 96 litros, y Q es el caudal, fijado en 30 ml/min. Experimentalmente, se esperó lograr una remoción del 80%, lo cual permitirá avanzar al siguiente nivel de TRH.

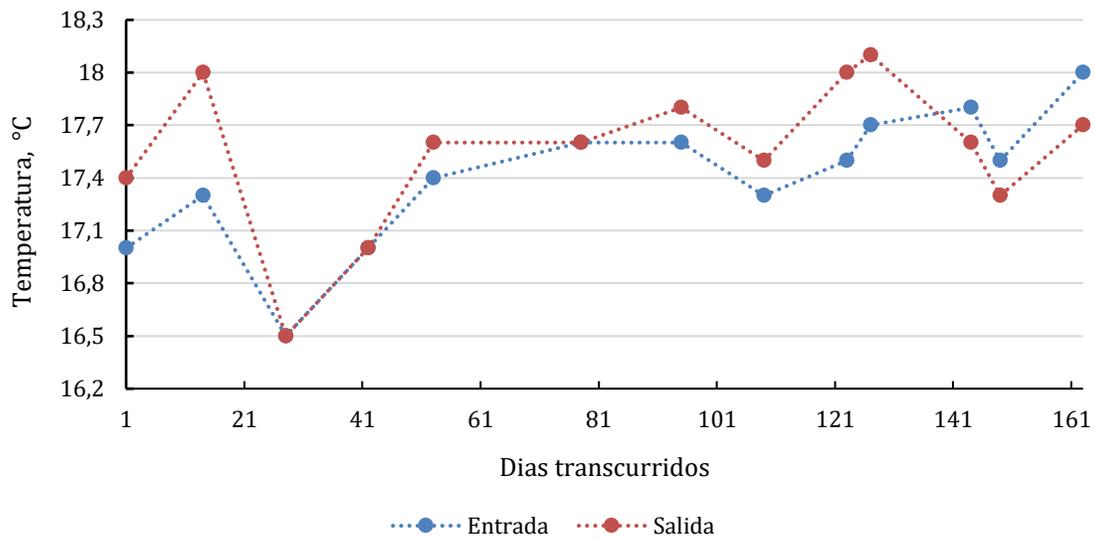
A continuación, se detallan los análisis realizados, abordando parámetros en la entrada y salida del sistema, como la temperatura, DQO, pH, alcalinidad bicarbonatada, alcalinidad total y acidez. Los datos obtenidos se representan gráficamente y se realiza un análisis descriptivo de cada parámetro.

Variación de temperatura. En la Figura 5 se puede observar que la temperatura de entrada y salida se mantiene en un rango estrecho, fluctuando entre 16,5°C y 18,1°C. Esta estabilidad en la

temperatura es importante para el rendimiento del reactor UASB, ya que las variaciones extremas de temperatura pueden afectar negativamente la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición de los residuos (Salazar-Larrota, et al., 2019).

Figura 5

Temperatura en la operación con un TRH de 2.2



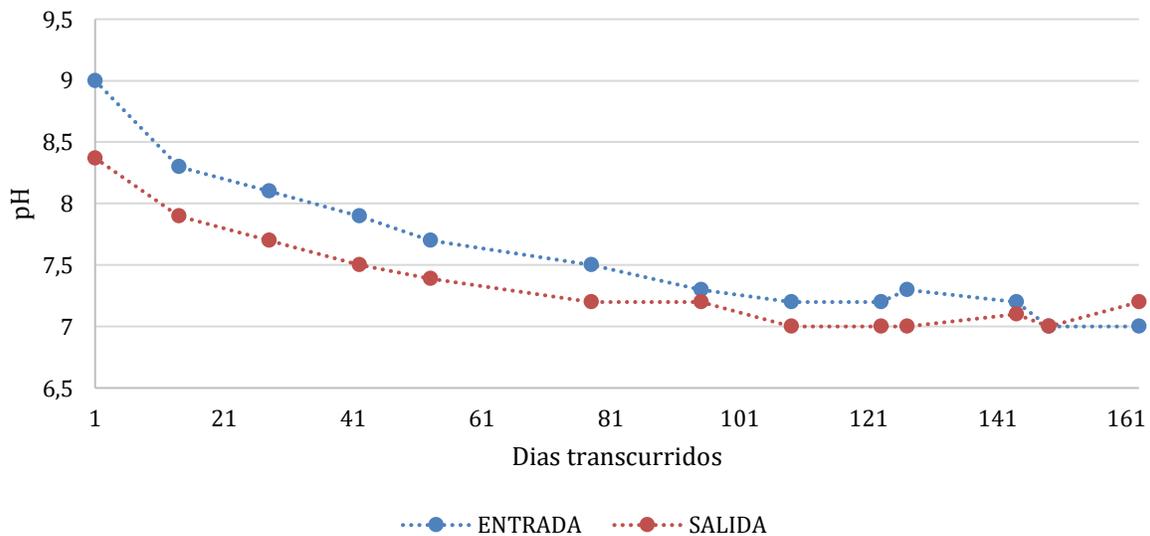
A pesar de las variaciones diarias y estacionales en la temperatura, la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida se mantiene relativamente constante alrededor de $0,4^{\circ}\text{C}$ en promedio. Esta pequeña diferencia indica que el reactor UASB está logrando una eficiente remoción de materia orgánica incluso a bajas temperaturas, lo cual es una señal positiva de su funcionamiento (Salazar-Larrota, et al., 2019).

Los datos muestran que el sistema se está adaptando bien a las condiciones psicrófilas, ya que las diferencias de temperatura entre entrada y salida son mínimas. Los microorganismos anaerobios en el reactor UASB parecen estar activos y capaces de ejecutar el proceso de hidrólisis en los contaminantes orgánicos incluso a temperaturas más bajas (Salazar-Larrota, et al., 2019). Dado que la temperatura es un factor crítico en los procesos biológicos, es crucial continuar monitoreando las condiciones de temperatura para asegurar un rendimiento constante y eficiente del reactor UASB a lo largo del tiempo.

Variación de pH. La variación del pH de entrada varía desde 7 (ligeramente alcalino) hasta 9 (alcalino), mientras que el pH de salida varía de 7 (neutro) a 8,4 (ligeramente alcalino), esto se puede observar en la figura 6. Estos cambios significativos en el pH de entrada y salida indican fluctuaciones en la acidez o alcalinidad del agua residual durante el período del experimento. A lo largo del experimento, el pH de salida generalmente es más bajo que el pH de entrada. Esto puede deberse a la actividad microbiana en el reactor, ya que algunos microorganismos producen ácidos durante el proceso de descomposición de la materia orgánica (Knobelsdorf Miranda, 2005). A pesar de estas diferencias, los valores de pH de salida parecen mantenerse en un rango relativamente aceptable para los estándares de calidad del agua.

Figura 6

pH en la operación con un TRH de 2.2



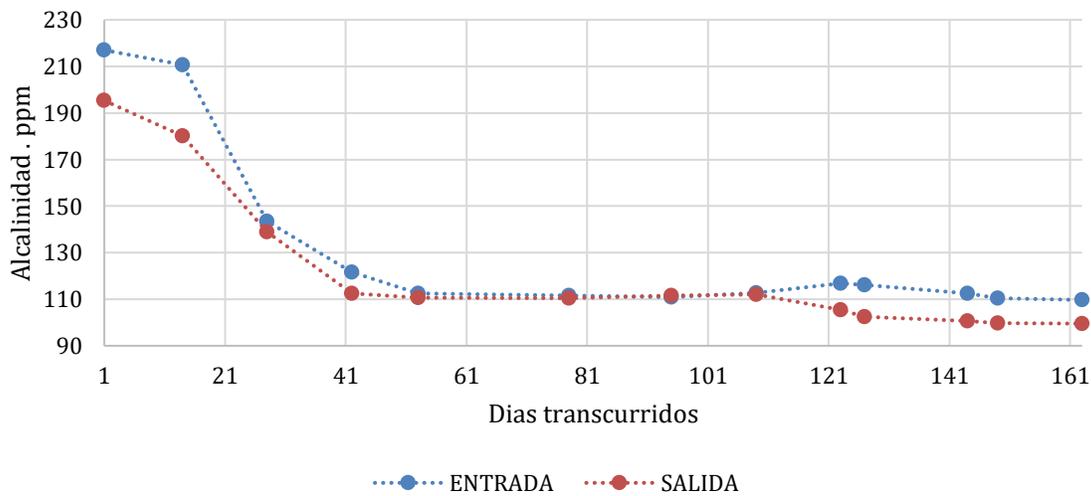
A pesar de las variaciones en el pH, los datos sugieren que el proceso de tratamiento en el reactor UASB está funcionando relativamente bien. La eficiencia del proceso se refleja en la capacidad del sistema para mantener el pH de salida dentro de un rango tolerable, como lo indica la figura 5 se encuentra en un rango promedio de 7,4 a pesar de las variaciones en el pH de entrada.

Ajustar el pH del agua residual puede ser crucial para optimizar la eficiencia del proceso. Cambios significativos en el pH podrían inhibir la actividad microbiana y, por lo tanto, afectar la capacidad del sistema para tratar eficazmente los contaminantes presentes en el agua residual. La variación del pH en el agua residual puede tener un impacto significativo en la eficiencia de los procesos de tratamiento. Mantener el pH dentro de un rango adecuado es esencial para garantizar un tratamiento eficaz y cumplir con los estándares ambientales. Es importante realizar un monitoreo y ajustar el pH para mantener el rendimiento óptimo del sistema de tratamiento de aguas residuales (Flores Paltán, F. G., & Velín Sagbay, J. P., 2014).

Alcalinidad. La alcalinidad es un parámetro importante en diversos ámbitos, como el tratamiento de aguas, la agricultura y la industria. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de alcalinidad en la entrada y salida del reactor.

Figura 7

Alcalinidad TRH 2,2



La alcalinidad puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso en los cuales se encuentran aspectos claves que genera en la eficiencia en la estabilidad del pH en el que actúa como un tampón que ayuda a mantener un pH adecuado las cuales implican reacciones biológicas, para la actividad de microorganismos anaerobios el cual es crucial para mantener la actividad

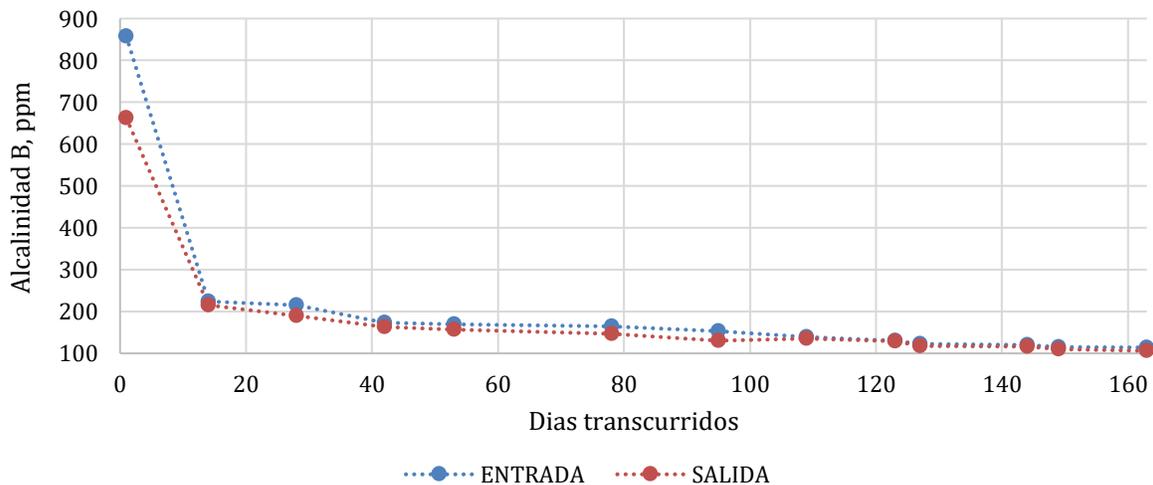
microbiana logrando una mejor eficiencia (Berlanga Clavijo et al., 2018). Teniendo en cuenta un proceso nitrificante para aguas residuales la alcalinidad en este proceso tiene un impacto significativo debido a que las bacterias nitrificantes tienden a funcionar mejor en un rango de pH alcalino (Berlanga Clavijo et al., 2018). Como se evidencia en este estudio el pH varió entre ligeramente alcalino y alcalino.

Alcalinidad bicarbonatada (ALCB). En la figura 8 se pueden observar los resultados de ALCB, se puede observar que con el transcurso de los días la alcalinidad tomó valores más bajos iniciando con 450 mg/l hasta llegar a un valor de 220 mg/l aproximadamente. La disminución de la alcalinidad bicarbonatada (ALCB) a medida que transcurre el tiempo puede estar relacionada con la acumulación de ácidos volátiles, lo que conduce a una disminución del pH en el sistema (Franke-Whittle et al., 2014).

Por otro lado, en el tratamiento de aguas residuales biológicas, el proceso de nitrificación consume alcalinidad a medida que el amoníaco se convierte en nitrito y luego en nitrato, lo que podría dar otra explicación a la disminución de su valor. Es importante aclarar que debe mantener una concentración mínima de alcalinidad para una actividad biológica adecuada.

Figura 8

ALCB en la operación con un TRH de 2,2

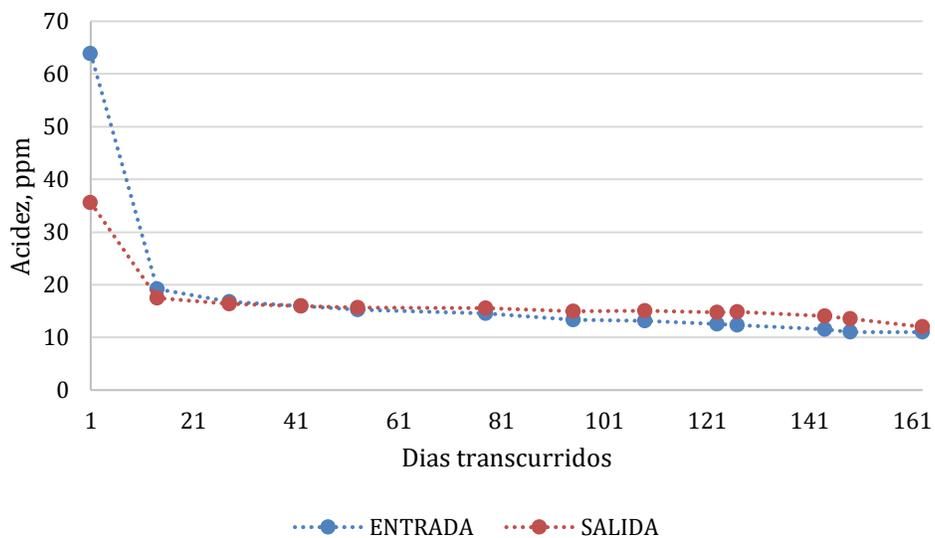


La alcalinidad es necesaria para amortiguar o estabilizar el pH con el fin de facilitar la fase de digestión anaeróbica del tratamiento de aguas residuales (Méndez-Ortiz et al. 2012).

Acidez. Los datos de acidez y alcalinidad recopilados en el reactor UASB revelan una relación inversa consistente entre ambas variables, indicando un fenómeno de neutralización en el sistema (Figura 9). A medida que la acidez disminuye, se observa un aumento en los valores de alcalinidad. Este patrón sugiere la presencia de reacciones químicas de neutralización, lo que podría relacionarse con la actividad microbiana en el reactor UASB.

Figura 9

Acidez con TRH 2,2



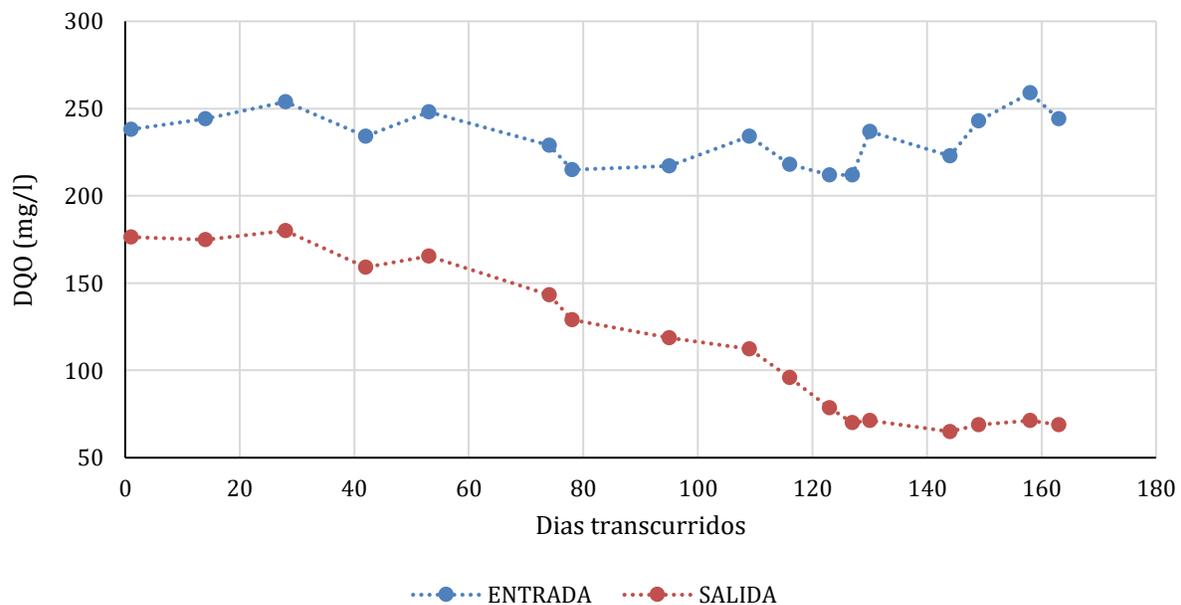
En términos de estabilidad, se observa que, a pesar de algunas variaciones en los datos, los valores de acidez y alcalinidad generalmente se mantienen dentro de rangos coherentes. Este equilibrio entre acidez y alcalinidad sugiere una capacidad tamponante en el sistema, lo cual es crucial para mantener condiciones óptimas para los procesos anaerobios (Berlanga Clavijo et al., 2018).

La disminución progresiva en los niveles de acidez podría ser indicativa de la eficacia del sistema en la degradación de la materia orgánica, llevando a una menor producción de ácidos orgánicos. Además, el aumento correspondiente en la alcalinidad podría sugerir la liberación de compuestos alcalinos o la neutralización de ácidos residuales (Méndez-Ortiz et al., 2012).

DQO. Debido a que el presente estudio se centra en la evaluación del rendimiento del tratamiento de aguas residuales, la principal variable de respuesta fue la Demanda Química de Oxígeno (DQO), en la figura 10 se presentan los resultados obtenidos de DQO.

Figura 10

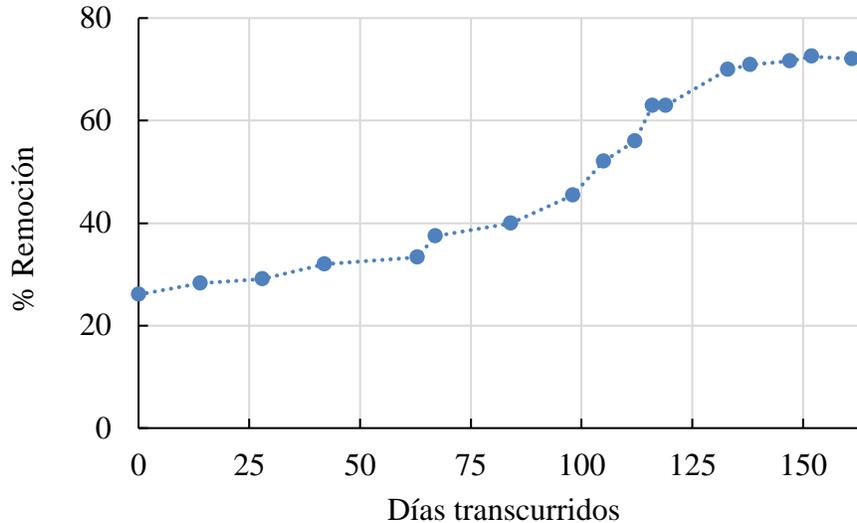
DQO para un TRH de 2,2



Los datos revelan una disminución significativa de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre la entrada y la salida del reactor, lo que indica una eficaz remoción de contaminantes orgánicos. El largo tiempo de retención hidráulica (TRH) de 2.2 días favorece la actividad microbiana y la degradación de la materia orgánica, siendo este parámetro crucial en la eficiencia del proceso.

Figura 11

Resultados de porcentaje de remoción para un TRH de 2,2



En la figura 11, se observan los porcentajes de remoción de materia orgánica. Los resultados iniciales muestran que, durante la fase inicial del experimento, con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 2,2 días y un caudal de 30 ml/min, la eficiencia de remoción de DQO alcanza el 72,3%. Este nivel de remoción inicial se atribuye principalmente al proceso de aclimatación del lecho de lodo a las condiciones operativas del sistema, lo que implica la adaptación de la biomasa microbiana al sustrato orgánico presente en el efluente.

A medida que progresó el experimento, se observa un incremento progresivo en la remoción de DQO, con una tasa de mejora que oscila entre el 1% y el 7% por semana. Esta tendencia ascendente sugiere una optimización continua del proceso biológico dentro del reactor, posiblemente debido a la proliferación de microorganismos especializados y a la mejora en las condiciones ambientales dentro del sistema. Este aumento gradual y sostenido en la eficiencia de remoción de DQO refleja la estabilización del proceso de tratamiento y la maduración de la comunidad microbiana presente en el lecho de lodo, lo que resulta en una mayor capacidad del sistema para degradar compuestos orgánicos. En conjunto, estos hallazgos respaldan la eficacia del TRH como una tecnología viable

para el tratamiento de aguas residuales, destacando su capacidad para adaptarse y mejorar su desempeño con el tiempo.

En este sentido, se estima que la remoción mínima de DQO al alcanzar la estabilización del proceso se ubicará en torno al 60%. Este valor indica la eficiencia del tratamiento para la eliminación de materia orgánica presente en las aguas residuales.

2.4.1 Operación con un TRH de 1,1 d

Con el objetivo de trabajar con TRH igual a 1,1 días se ajustó el caudal a 60 ml/min manteniendo constante el volumen total de reactor igual a 96 L. La variación de TRH buscó evaluar la dependencia de la remoción de materia orgánica con esta variable, ya que, de acuerdo con la literatura en sistemas biológicos, como lodos activados, lagunas de estabilización o reactores anaerobios/aerobios, un TRH más largo generalmente favorece una mayor remoción de carga orgánica debido al tiempo adicional para procesos biológicos (Caldera et al., 2003).

Sin embargo, la elección del TRH también depende de otros factores, como el tipo de contaminantes presentes, la temperatura del agua y los objetivos específicos de tratamiento. Cada sistema de tratamiento debe ser diseñado y operado teniendo en cuenta estas consideraciones para lograr la máxima eficiencia en la remoción de carga orgánica (Caldera et al., 2003).

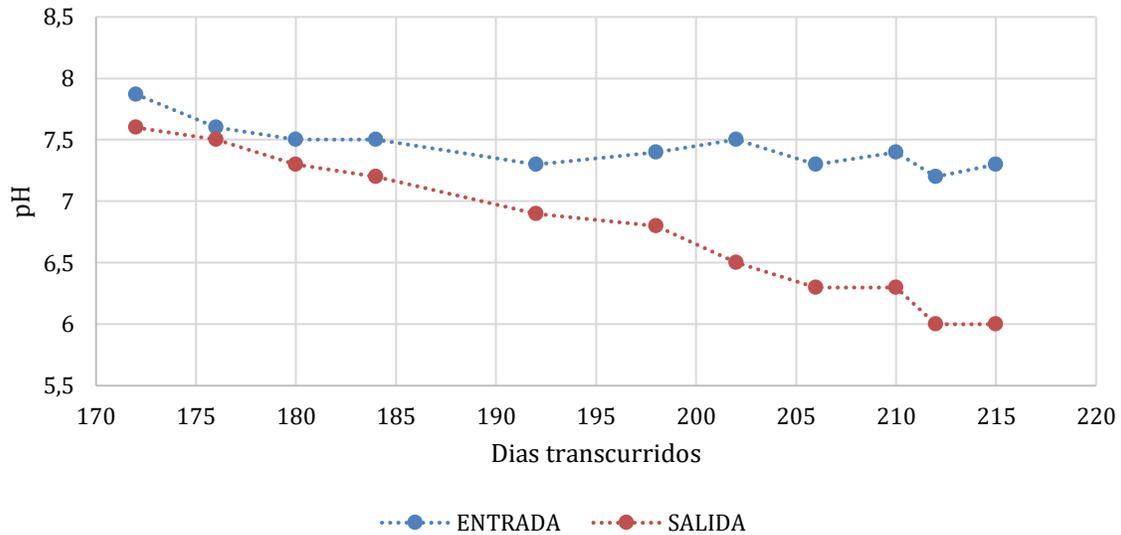
A continuación, se presentan los análisis realizados. Respecto a temperatura, pH, alcalinidad bicarbonatada, alcalinidad Total, acidez y DQO para un TRH 1,1d en el que se representa gráficamente los datos obtenidos y se hace un análisis descriptivo de cada parámetro.

Variación de pH. En la figura 12 se observan los resultados de pH obtenidos para un TRH igual a 1,1 días. Se observa una disminución de los valores de pH, este comportamiento sugiere una alteración en el equilibrio químico y biológico del proceso, lo que potencialmente indica una disminución en la eficiencia de remoción de contaminantes. Este fenómeno puede ser atribuido a una serie de factores interrelacionados que impactan la capacidad del sistema para mantener condiciones óptimas de funcionamiento. Por ejemplo, la sobrecarga del sistema, derivada de un

aumento repentino en la carga de contaminantes orgánicos o inorgánicos, puede sobrepasar la capacidad de procesamiento del reactor, provocando una acumulación de productos intermedios y una disminución en el pH del medio.

Figura 12

pH en la operación con un TRH de 1,1



La reducción en la eficiencia del proceso puede llevar a una acumulación de ácidos debido a la falta de neutralización adecuada de los productos ácidos generados durante las reacciones biológicas y químicas. Lo anterior podría ser una causa de la disminución en el pH del agua de salida del reactor. Esta acidificación puede ser una indicación de que el proceso biológico no está funcionando de manera óptima y puede estar generando ácidos en lugar de productos finales estables y neutros (Méndez-Ortiz et al., 2012).

Cuando el porcentaje de remoción baja en un reactor, el pH tiende a bajar. En un sistema de tratamiento de aguas, especialmente en reactores biológicos, la eficiencia del proceso está relacionada con la capacidad de los microorganismos para realizar las reacciones químicas necesarias. Cuando esta eficiencia disminuye, las reacciones biológicas pueden generar más ácidos o liberar productos químicos que bajan el pH del agua (Méndez-Ortiz et al., 2012). Las reacciones

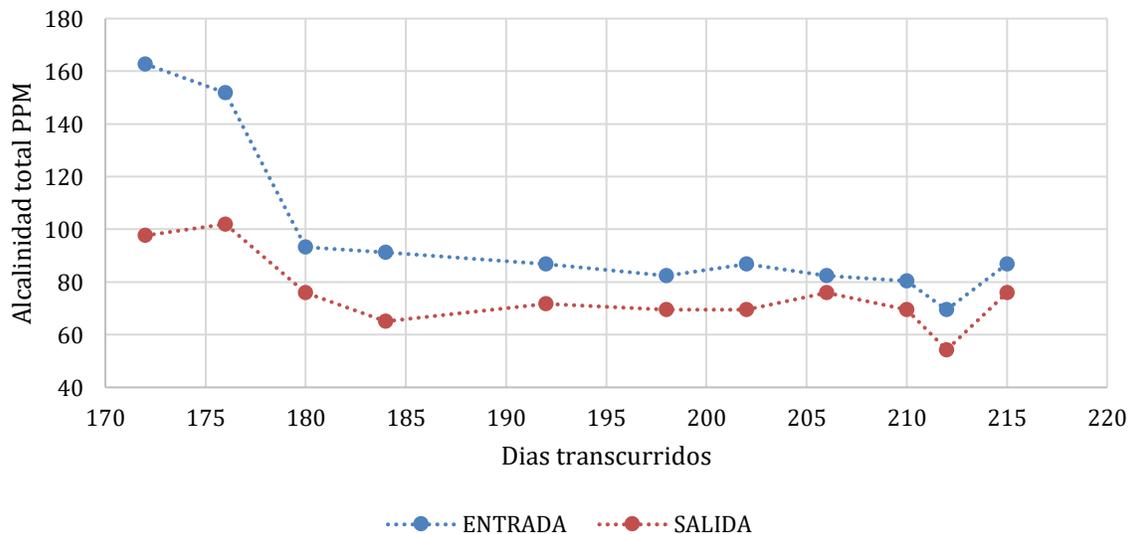
biológicas en el tratamiento de aguas a menudo implican la conversión de sustancias orgánicas en ácidos, y estos ácidos pueden disminuir el pH del agua. Si la eficiencia del proceso disminuye y menos sustancias orgánicas son tratadas, los ácidos no se neutralizan adecuadamente, lo que puede resultar en una disminución del pH del agua.

Por lo tanto, en un reactor donde el porcentaje de remoción disminuye, es probable que haya una acumulación de ácidos debido a la falta de reacciones de neutralización, lo que lleva a una disminución del pH del agua (Méndez-Ortiz et al., 2012).

Alcalinidad. Los datos presentados en la figura 13 revelan una clara correlación entre las variaciones en el pH y los valores de alcalinidad total en el reactor UASB, evidenciando una relación estrecha entre estos parámetros críticos. La reducción gradual del pH de 7.6 a 6.0 se asocia con cambios concomitantes en la alcalinidad total, mostrando fluctuaciones que sugieren una capacidad buffer dinámica en respuesta a las modificaciones operativas.

Figura 13

Alcalinidad TRH 1,1

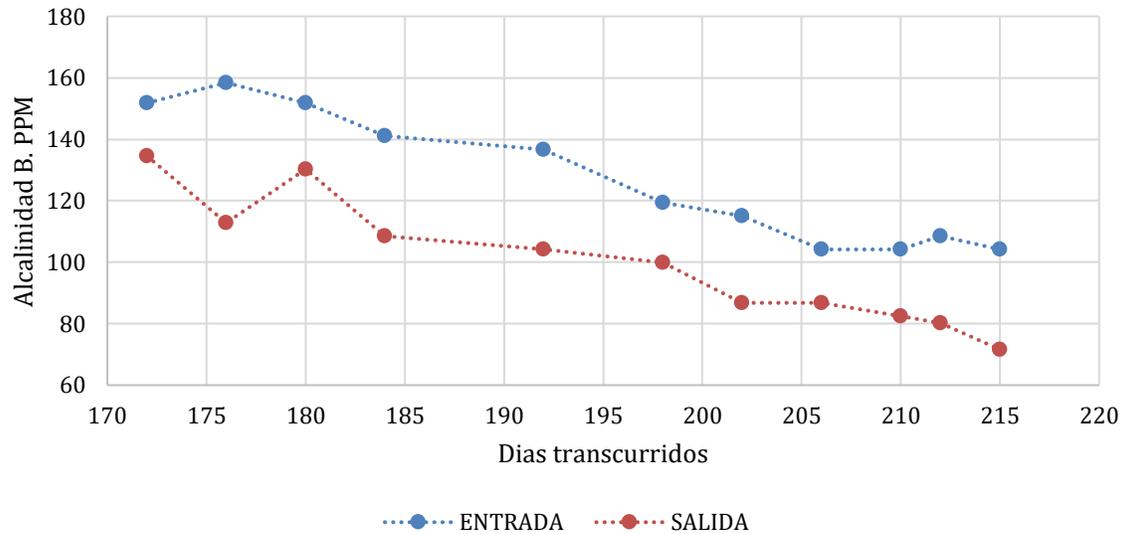


La disminución en la alcalinidad total, especialmente hacia el final del periodo de muestreo, podría indicar una disminución en la capacidad del sistema para neutralizar ácidos, posiblemente relacionada con una carga orgánica más elevada debido al aumento del caudal. Esta interconexión resalta la importancia de considerar tanto el pH como la alcalinidad total para evaluar la estabilidad del sistema (Méndez-Ortiz, et al., 2012).

En el contexto del análisis de datos de un reactor UASB, el efecto buffer se vincula con la capacidad del sistema para mantener el pH dentro de un rango deseado a pesar de variaciones en la carga orgánica o cambios operativos. La alcalinidad total, uno de los indicadores clave, está estrechamente relacionada con este efecto buffer, ya que representa la capacidad de neutralizar ácidos presentes en la solución. Cuando se observa una disminución en la alcalinidad total junto con una disminución en el pH, podría indicar una disminución en la capacidad buffer del sistema, sugiriendo la necesidad de ajustes operativos o de diseño para mantener condiciones estables de tratamiento (Berlanga et al., 2018).

Este análisis permite concluir que la reducción del tiempo de retención hidráulica y el aumento del caudal han generado impactos significativos en la capacidad buffer del reactor, subrayando la necesidad de ajustes operativos para mantener condiciones óptimas de tratamiento y estabilidad del pH en el reactor UASB.

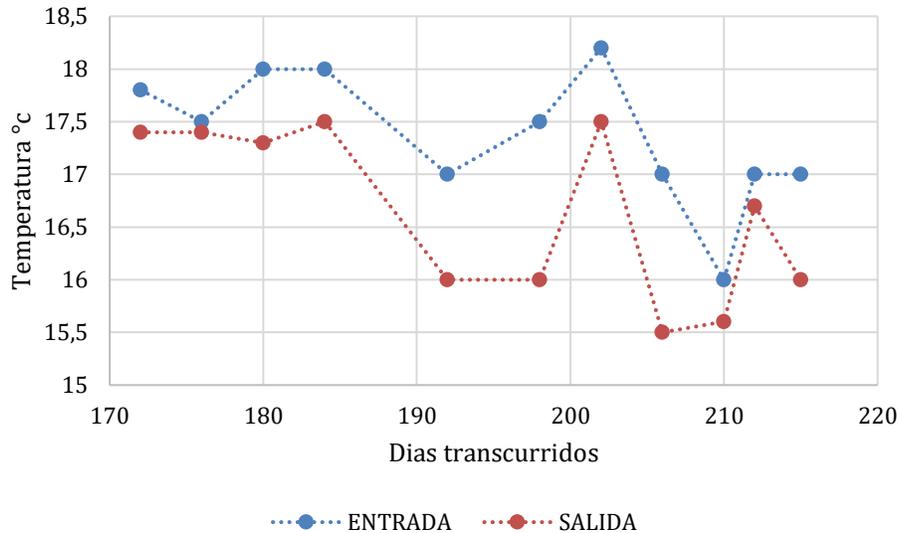
ACLB. En la figura 14 se observa una disminución de la alcalinidad bicarbonatada (ACLB) desde la entrada hasta la salida del reactor, esto puede indicar que el bicarbonato está siendo utilizado como una fuente primaria de alcalinidad para neutralizar los ácidos presentes en el agua de entrada al sistema (Méndez-Ortiz, et al., 2012).

Figura 14*ALCB con THR 1,1*

Este fenómeno resalta la importancia del sistema bicarbonato-carbonato como parte integral del efecto buffer, donde la capacidad de neutralización de ácidos se ve influenciada directamente por la concentración de alcalinidad bicarbonatada. La relación entre estos parámetros sugiere que la variabilidad en la alcalinidad total está, en gran medida, impulsada por cambios en la alcalinidad bicarbonatada. Es esencial considerar cuidadosamente la gestión de esta fuente de alcalinidad para mantener la eficiencia del sistema y la estabilidad del pH (Méndez-Ortiz, et al., 2012).

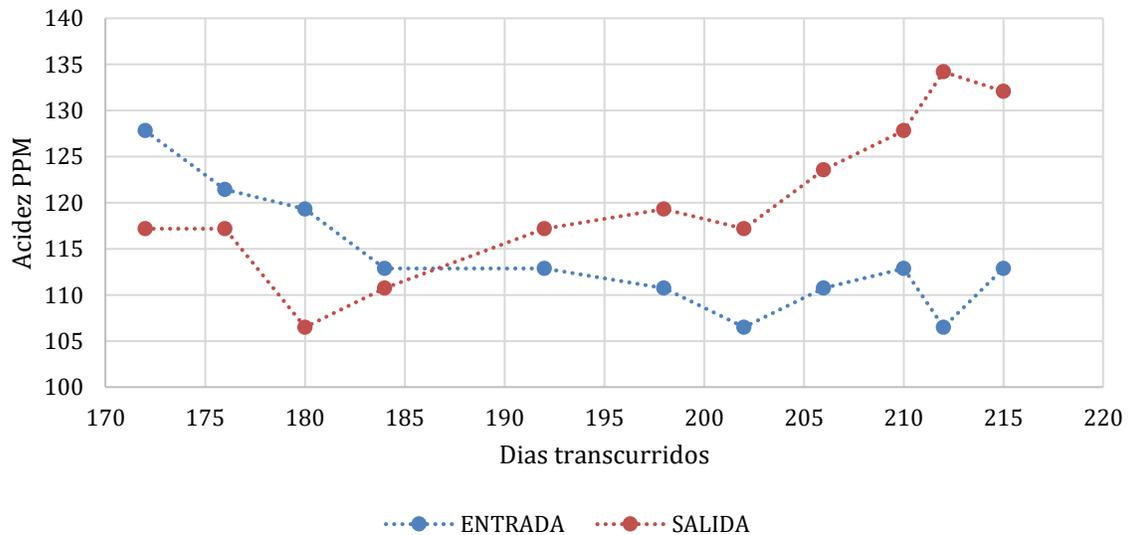
Además, este análisis sugiere que la reducción del tiempo de retención hidráulica y el aumento del caudal pueden haber influido en la utilización de la alcalinidad bicarbonatada, afectando la capacidad buffer del sistema.

Temperatura. La observación de los datos de temperatura a la salida del reactor UASB proporciona información valiosa sobre las condiciones operativas del sistema, estos valores se pueden observar en la figura 15.

Figura 15*Temperatura con TRH 1,1*

Los valores registrados oscilan entre 15.5°C y 17.5°C a lo largo del período de muestreo. La estabilidad relativa en los registros sugiere que la temperatura se mantiene dentro de un rango moderado. Es importante destacar que la temperatura puede tener impactos significativos en la actividad biológica y en la eficiencia de los procesos de tratamiento. Una temperatura más baja puede ralentizar las reacciones biológicas, afectando la tasa de degradación de materia orgánica, mientras que temperaturas más altas podrían favorecer una mayor actividad microbiana (Salazar et al., 2019).

Acidez. Al examinar detenidamente los datos del reactor UASB operando con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 1.1 días y un caudal de 60 ml/min (Figura 16), se destaca la importancia de la acidez como un parámetro fundamental para comprender la dinámica química del sistema.

Figura 16*Acidez con TRH 1,1*

La variabilidad observada en los datos de acidez, que oscilan entre 106.5 y 134.19, refleja la compleja interacción entre los procesos biológicos y químicos que tienen lugar dentro del reactor. Esta amplia gama de valores de acidez puede ser indicativa de múltiples factores influyentes, tales como la variabilidad en la carga orgánica del efluente alimentado al reactor, la composición específica de los compuestos presentes en el influente y la eficiencia de los procesos de tratamiento, incluida la actividad de la biomasa microbiana presente en el sistema.

La comprensión de esta variabilidad en los niveles de acidez es crucial para identificar posibles desafíos operativos y optimizar el rendimiento del reactor UASB. Además, estos datos resaltan la necesidad de una monitorización continua y un análisis detallado de los parámetros clave para guiar las decisiones de gestión y control en el tratamiento de aguas residuales. Al considerar la acidez como un indicador central, se puede obtener una visión más completa de la eficacia del proceso de tratamiento y desarrollar estrategias específicas para mejorar la estabilidad y la eficiencia del sistema en su conjunto.

La disminución progresiva del pH desde 7.6 hasta 6.0 a lo largo del tiempo refuerza la hipótesis de la acidificación del medio, probablemente relacionada con la acumulación de ácidos orgánicos

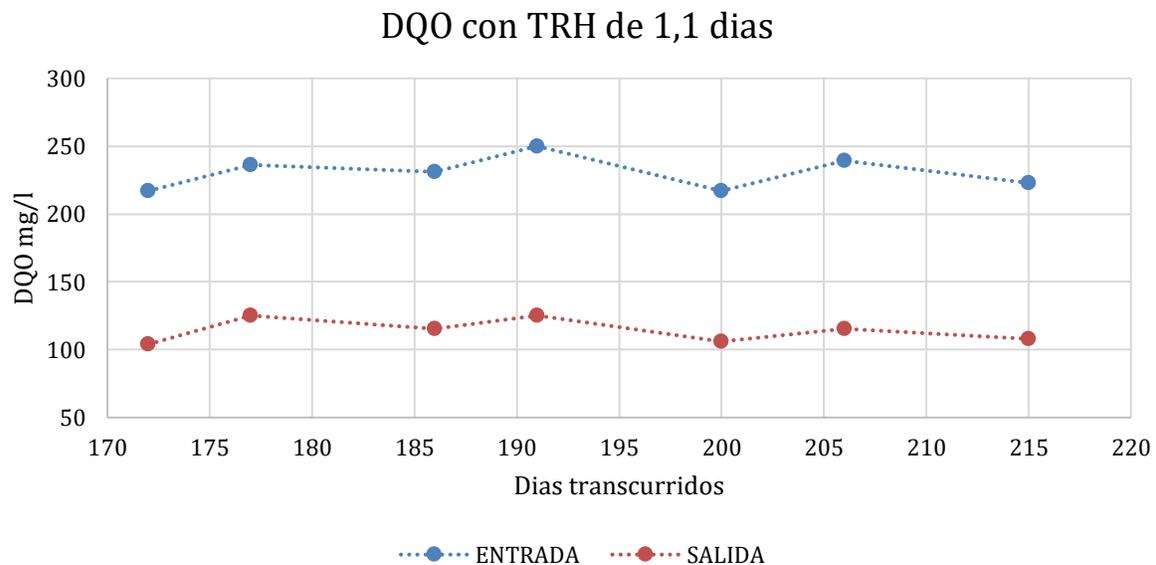
o la liberación de subproductos metabólicos. Este descenso en el pH, acompañado por la variabilidad en la acidez, plantea interrogantes sobre la capacidad buffer del sistema para mantener la estabilidad en condiciones cambiantes (Berlanga et al., 2018).

No obstante, la coherencia en los valores de acidez, dentro del rango observado, sugiere un posible efecto buffer eficiente. La capacidad del sistema para mantener niveles relativamente constantes de acidez, incluso ante cambios en la carga orgánica y el TRH, destaca su resistencia y adaptabilidad (Méndez-Ortiz et al., 2012).

DQO. En la figura 17 se pueden evidenciar los resultados de DQO trabajando con un TRH de 1,1 días.

Figura 17

DQO con TRH 1,1 días

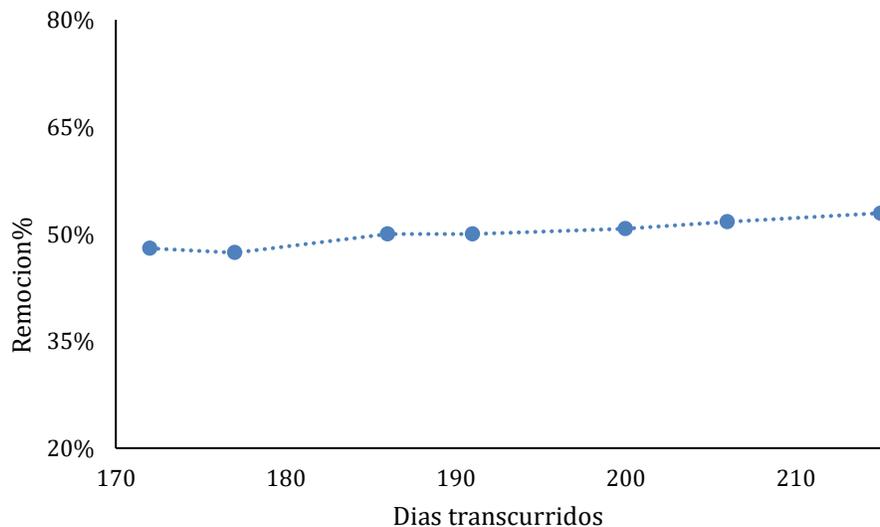


Los datos proporcionados muestran la concentración de DQO en la entrada y salida del reactor UASB durante la segunda fase, donde se redujo el tiempo de retención hidráulica (TRH) a 1.1 días. Esta reducción en el TRH puede tener un impacto significativo en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en el reactor UASB. Según estudios previos, como el realizado por Chernicharo

(2007), la disminución del TRH puede influir en la actividad microbiana y las reacciones bioquímicas dentro del reactor, lo que afecta la capacidad del sistema para degradar la materia orgánica presente en el efluente. Además, investigaciones de Lettinga et al. (1980) han demostrado que el TRH es un factor crítico en la eficiencia de remoción de contaminantes en los reactores UASB, ya que influye en la cinética de degradación de la materia orgánica por parte de la comunidad microbiana anaeróbica. Al observar los datos proporcionados, se puede notar que la DQO de entrada es generalmente más alta que la DQO de salida, lo que sugiere una remoción efectiva de contaminantes en el reactor UASB. Sin embargo, la variabilidad en los datos indica la necesidad de un análisis detallado para comprender mejor el impacto del cambio en el TRH en la eficiencia del tratamiento. Este análisis puede proporcionar valiosa información para optimizar el rendimiento del reactor UASB y garantizar una eficiente remoción de DQO en condiciones de TRH reducido.

Figura 18

Resultados de porcentaje de remoción con TRH 1,1 días



La reducción del tiempo de retención hidráulica (TRH) a 1.1 días en el reactor UASB muestra un impacto significativo en la eficiencia de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en comparación con el TRH de 2.2 días. Según Lettinga et al., (1980), un TRH más corto implica

una residencia más breve del agua residual en el reactor, limitando así el tiempo disponible para las reacciones bioquímicas anaeróbicas y la actividad microbiana. Esta limitación temporal puede afectar la eficacia de la degradación de la materia orgánica y, por ende, la remoción de DQO. Además, la reducción del TRH puede influir en la composición y la actividad de la comunidad microbiana presente en el reactor (Mata-Alvarez et al., 2014).

La figura 18 revela un patrón interesante en cuanto a la remoción de DQO después de la reducción del tiempo de retención hidráulica (TRH) en el reactor UASB. Inicialmente, se observa una disminución del 50% en la concentración de DQO en el efluente del reactor, lo que indica una mejora en la eficiencia del tratamiento. Esta disminución inicial puede atribuirse a una mayor actividad microbiana y una cinética de degradación más rápida de la materia orgánica en el reactor, como lo sugiere el estudio de Chernicharo (2007), donde se evidencia que la reducción del TRH puede aumentar la actividad microbiana y mejorar la eficiencia del proceso anaeróbico. Sin embargo, es interesante observar que con el transcurso de los días, no se observan cambios significativos en la remoción de DQO. Este estancamiento podría indicar que el sistema ha alcanzado un equilibrio o una limitación en su capacidad de tratamiento bajo las nuevas condiciones por lo que se decide suspender y darle fin al proceso experimental. Este fenómeno se alinea con los hallazgos de Lettinga et al. (1980), quienes destacan que existe un punto óptimo en la relación entre el TRH y la eficiencia de remoción de DQO, más allá del cual aumentar la reducción del TRH puede no resultar en mejoras adicionales significativas en la eficiencia del tratamiento.

2.5 Análisis estadístico

La inclusión de dos condiciones operativas diferentes en el estudio del reactor UASB, caracterizadas por tiempos de retención hidráulica (TRH) de 2.2 días a un caudal de 30 ml/min y TRH de 1.1 días a un caudal de 60 ml/min, ha introducido una dimensión adicional de complejidad en el análisis del sistema. Este enfoque experimental permite explorar cómo las variaciones en el TRH y el caudal influyen la eficiencia del proceso de tratamiento de aguas residuales en el reactor UASB. La comparación de estos conjuntos de datos proporciona una visión integral de cómo diferentes condiciones operativas pueden impactar la dinámica química y biológica dentro

del reactor, lo que resulta crucial para optimizar su rendimiento y comprender su respuesta ante variaciones en la carga orgánica y las condiciones ambientales.

Este enfoque analítico no solo proporciona información detallada sobre la influencia de las condiciones operativas en el rendimiento del reactor UASB, sino que también contribuye al desarrollo de estrategias de gestión más efectivas para la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Al identificar las condiciones óptimas para la operación del reactor en términos de TRH y caudal, los operadores pueden ajustar los parámetros operativos para maximizar la eficiencia del tratamiento y garantizar una remoción efectiva de contaminantes. Además, este análisis comparativo sienta las bases para investigaciones futuras orientadas a una comprensión más profunda de los factores que influyen en la eficacia de los procesos de tratamiento de aguas residuales en reactores UASB, lo que potencialmente conduce a mejoras significativas en la gestión y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales.

La elección de un TRH más largo con un caudal menor podría indicar una estrategia para mejorar la eficiencia de la remoción de carga orgánica, permitiendo una mayor permanencia del agua en el reactor para procesos biológicos más extensos. Por otro lado, la condición con TRH más corto y mayor caudal podría estar orientada a un tratamiento más rápido, pero posiblemente con menor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Para enriquecer aún más este análisis, es fundamental investigar la variabilidad de parámetros críticos como el pH, la acidez, la alcalinidad y otros indicadores de la calidad del agua, en ambas condiciones operativas del reactor UASB. Estos parámetros son fundamentales para comprender la dinámica química y biológica del sistema de tratamiento de aguas residuales, y su variabilidad puede revelar información crucial sobre la respuesta del reactor ante cambios en las condiciones operativas. Por ejemplo, cambios significativos en el pH pueden indicar alteraciones en la actividad microbiana o en la eficiencia de los procesos de tratamiento, mientras que variaciones en la alcalinidad pueden influir en la capacidad del sistema para neutralizar ácidos y mantener un entorno adecuado para la actividad biológica.

Además, la aplicación de análisis estadísticos específicos, como pruebas de significancia y análisis de varianza, para comparar las distribuciones de datos bajo ambas condiciones operativas, proporciona una evaluación más precisa de la consistencia y robustez de las respuestas del sistema. Estos enfoques estadísticos permiten identificar patrones significativos en los datos y determinar si las diferencias observadas entre las condiciones operativas son estadísticamente significativas o simplemente el resultado de la variabilidad aleatoria. Al integrar estos análisis estadísticos con la evaluación detallada de los parámetros clave, se obtiene una comprensión más completa y rigurosa de cómo las diferentes condiciones operativas afectan el rendimiento del reactor UASB y cómo pueden optimizarse para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales.

2.5.1 Análisis descriptivo

En la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos del análisis estadístico considerando cada uno de los parámetros medidos para ambos tiempos de residencia.

Tabla 11

Análisis estadístico de parámetros en el efluente

Parámetro	TRH (días)	Mínimo	Máximo	Promedio	Error Estándar	Mediana	Varianza
pH	1.1	6.0	7.6	6.4	0.57	6.3	0.677
	2.2	7.0	8.4	7.5	0.41	7.2	0.242
Acidez (mg/L)	1.1	106.5	134.2	117.7	8.14	117.2	112.6
	2.2	11.5	63.9	17.6	4.17	15.1	233.5
Alcalinidad T (mg/L)	1.1	54.2	102.0	73.2	14.85	71.6	374.4
	2.2	100.6	195.3	122.3	27.02	110.7	1233.2
Temperatura °C	1.1	15.5	17.7	16.6	0.51	16.7	0.596
	2.2	16.0	17.8	17.2	0.38	17.3	0.418

ACLB (mg/L)	1.1	71.6	134.5	93.5	16.51	86.8	551.2
	2.2	106.0	662.0	192.2	72.41	157	26863

El análisis comparativo revela importantes diferencias en varios parámetros entre los dos tiempos de retención hidráulica (TRH) evaluados en el reactor UASB. Comenzando con el pH, una medida fundamental que indica la acidez o alcalinidad del medio, se observa una diferencia notable entre los TRH de 1.1 días y 2.2 días. El pH promedio en el TRH de 1.1 días es de 6.42, mientras que en el TRH de 2.2 días es de 7.46. Esta diferencia sugiere que el TRH más largo está asociado con un medio más alcalino en comparación con el TRH más corto.

El pH es un factor crítico en los procesos biológicos y químicos que ocurren en el reactor UASB. La variación en el pH entre los dos TRH puede estar relacionada con la actividad microbiana, la producción de ácidos o bases como subproductos metabólicos y la capacidad del sistema para neutralizar estos compuestos. Un pH más alto en el TRH de 2.2 días podría indicar una mayor actividad metabólica y una mayor producción de compuestos alcalinos por parte de los microorganismos presentes en el reactor.

Al examinar la acidez, medida en mg CaCO₃/L, encontramos una marcada discrepancia entre los dos TRH. La acidez promedio en el TRH de 1.1 días es de 117.69 mg CaCO₃/L, mientras que en el TRH de 2.2 días es de 17.63 mg CaCO₃/L. Esta diferencia indica una reducción significativa en la acidez en el TRH más largo, lo que sugiere una menor producción de ácidos o una mayor capacidad de neutralización en comparación con el TRH más corto.

La acidez es un indicador directo de la concentración de ácidos presentes en el reactor. Una menor acidez en el TRH de 2.2 días puede indicar una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica, ya que los productos ácidos de la descomposición orgánica son neutralizados más eficientemente en condiciones de TRH más largo. Esto puede ser el resultado de una mayor actividad microbiana y un tiempo de residencia más prolongado para los procesos de descomposición y neutralización en el TRH más largo.

Continuando con la alcalinidad total, observamos una diferencia similar entre los dos TRH. La alcalinidad total promedio en el TRH de 1.1 días es de 73.25 mg CaCO₃/L, mientras que en el TRH de 2.2 días es de 122.31 mg CaCO₃/L. Esta discrepancia sugiere que el TRH más largo está asociado con una mayor capacidad del reactor para neutralizar ácidos y mantener un pH estable en comparación con el TRH más corto.

La alcalinidad total es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Una mayor alcalinidad total en el TRH de 2.2 días puede indicar una mayor capacidad del sistema para mantener un pH estable en condiciones de carga orgánica variable. Esto puede atribuirse a una mayor actividad microbiana y una mayor producción de compuestos alcalinos en el TRH más largo, lo que permite al sistema resistir cambios en la acidez o alcalinidad del medio de manera más efectiva.

Por otro lado, al examinar la temperatura, no encontramos una diferencia significativa entre los dos TRH. La temperatura promedio en el TRH de 1.1 días es de 16.56°C, mientras que en el TRH de 2.2 días es de 17.25°C. Esta falta de diferencia sugiere que ambos TRH mantienen condiciones térmicas similares en el reactor, lo que podría deberse a factores externos como la temperatura ambiente.

La temperatura es un factor importante que influye en la actividad microbiana y los procesos biológicos en el reactor. La falta de diferencia en la temperatura entre los TRH sugiere que ambos TRH mantienen condiciones térmicas adecuadas para el crecimiento microbiano y la actividad enzimática. Esto puede ser crucial para garantizar una eficiente degradación de la materia orgánica y una alta remoción de contaminantes en el reactor.

Finalmente, al analizar la alcalinidad bicarbonato, observamos una discrepancia significativa entre los dos TRH. La alcalinidad bicarbonato promedio en el TRH de 1.1 días es de 93.54 mg CaCO₃/L, mientras que en el TRH de 2.2 días es de 192.2 mg CaCO₃/L. Esta diferencia sugiere que el TRH más largo está asociado con una mayor capacidad del reactor para mantener un pH estable y resistir cambios en la acidez o alcalinidad del medio.

La alcalinidad bicarbonato actúa como un tampón de pH, ayudando a mantener un pH estable en el reactor. Una mayor alcalinidad bicarbonato en el TRH de 2.2 días puede indicar una mayor capacidad del sistema para resistir cambios bruscos en el pH y mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana. Esto puede ser crucial para garantizar una eficiente degradación de la materia orgánica y una alta remoción de contaminantes en el reactor.

En resumen, el análisis comparativo revela que el TRH tiene un impacto significativo en la química y el equilibrio del reactor UASB. Estas diferencias destacan la importancia de considerar cuidadosamente el TRH en el diseño y la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en reactores UASB. La variación en el pH, acidez, alcalinidad total y alcalinidad bicarbonato entre los dos TRH subraya la importancia de optimizar el tiempo de retención hidráulica para maximizar la eficiencia y la capacidad del reactor en la remoción de carga orgánica y la mejora de la calidad del efluente tratado.

Remoción de materia orgánica. El análisis del reactor UASB dejar ver una interesante dinámica en la degradación de la materia orgánica en función de los diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH) aplicados. La materia orgánica en aguas residuales es un componente crítico para la eficacia de los sistemas de tratamiento biológico, y su degradación es fundamental para la eliminación de contaminantes.

Al observar los resultados, es evidente que el TRH más largo (2.2 días) muestra una tendencia hacia una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica en comparación con el TRH más corto (1.1 días). Esto se refleja en varios parámetros que indican una mejor capacidad del sistema para manejar y degradar la carga orgánica.

La acidez es un indicador clave de la concentración de ácidos orgánicos presentes en el sistema. La reducción significativa en la acidez observada en el TRH más largo sugiere una menor acumulación de ácidos orgánicos, lo que puede ser atribuido a una mayor actividad microbiana y a una tasa de degradación más rápida de la materia orgánica. Esta disminución en la acidez indica una mayor eficiencia en la descomposición de la materia orgánica y una potencial reducción en la formación de subproductos no deseados.

Además, la alcalinidad total y el bicarbonato son indicadores importantes de la capacidad del sistema para neutralizar los ácidos orgánicos y mantener un pH estable. La mayor alcalinidad total y bicarbonato en el TRH más largo sugiere una mayor capacidad del sistema para neutralizar los ácidos orgánicos liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Esto es crucial para mantener condiciones óptimas para la actividad microbiana y promover una degradación eficiente de la materia orgánica.

En conjunto, estos hallazgos indican que el TRH más largo proporciona condiciones más favorables para la degradación de la materia orgánica en el reactor UASB. La reducción en la acidez y la mayor capacidad de neutralización observada en el TRH más largo sugieren una mayor eficiencia en la remoción de la carga orgánica y una potencial mejora en la calidad del efluente tratado.

3. Conclusiones

La eficacia del sistema se evidencia en la fase de aclimatación y en la eliminación de carga orgánica, alcanzando un porcentaje significativo de remoción del 73%. Este resultado no solo subraya la prontitud de respuesta del UASB a condiciones psicrófilas, sino que también resalta su capacidad para asegurar una adaptación eficiente a nuevas condiciones de sustrato, estableciendo así las bases para un desempeño continuo y exitoso en entornos más fríos

La implementación de diferentes TRH no solo ha permitido evaluar la eficiencia del sistema, sino que también destaca su capacidad para adaptarse y mantener un desempeño notable en diversas condiciones hidráulicas. La eficiencia observada durante este análisis posiciona al UASB como una tecnología adaptable, capaz de enfrentar desafíos operativos

La flexibilidad exhibida por los microorganismos en este entorno específico permitió una reproducción y metabolismo eficientes, contraviniendo la suposición tradicional de que estos procesos son más efectivos en condiciones mesófilas. La capacidad de formar colonias y favorecer su propio desarrollo en condiciones psicrófilas subraya la versatilidad propia de los microorganismos anaerobios, destacando su capacidad de respuesta a condiciones locales específicas.

El aporte de este trabajo es significativo al demostrar la viabilidad operativa del sistema en bajas temperaturas, evidenciando la capacidad de adaptación y resiliencia microbiana para realizar la hidrólisis de la materia orgánica particulada eficientemente, lo cual es fundamental para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales en climas fríos. Además, esta investigación proporciona datos empíricos que pueden guiar la optimización de parámetros operativos como el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica, apoyando la adopción de tecnologías anaeróbicas más sostenibles y menos intensivas en energía.

Durante la fase de arranque al cabo de 28 días, se alcanzó una remoción de carga orgánica del 70% . Este resultado es indicativo de que el reactor UASB presentó un comportamiento eficiente en términos de eliminación de carga orgánica durante el periodo de arranque. El nivel de remoción

logrado sugiere que el proceso de adaptación de la biomasa y las condiciones operativas establecidas fueron adecuadas para cumplir con una parte significativa del objetivo propuesto.

El hecho de que un TRH de 2.2 días permita alcanzar una remoción del 70%, en comparación con el 50% logrado con un TRH de 1.1 días, pone de manifiesto la importancia del tiempo de contacto entre el sustrato y la biomasa activa para lograr una mayor degradación orgánica. Estos resultados sugieren que, para maximizar la eficiencia del reactor UASB en la remoción de carga orgánica bajo condiciones psicrófilas, es fundamental optimizar el TRH. No obstante, se debe considerar un balance entre la remoción de DQO y otros factores operativos.

4. Recomendaciones

Se sugiere que futuros estudios consideren la inclusión de sólidos totales (ST) ya que este es un indicador clave del contenido de partículas suspendidas y disueltas en el reactor. La medición de ST podría proporcionar información valiosa sobre la acumulación de sólidos en el sistema, su efecto en la eficiencia del tratamiento y su relación con el tiempo de retención hidráulica y la remoción de carga orgánica. Incorporar este análisis permitirá una evaluación más integral del rendimiento del reactor y ayudará a optimizar su diseño y operación.

Se recomienda que futuros estudios incluyan la medición de AGV, ya que estos compuestos intermedios son indicadores clave de la estabilidad del proceso y del equilibrio entre la producción de ácidos y su posterior conversión en biogás. La acumulación de AGV puede señalar problemas en la fase de acidogénesis y afectar la eficiencia general del reactor. Por tanto, el seguimiento de AGV en investigaciones futuras permitirá una comprensión más profunda del comportamiento del reactor y facilitará la optimización del sistema bajo condiciones psicrófilas.

Referencias bibliográficas

- Álvarez Rodríguez, J. A. (2003). Tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas en planta piloto.
- Arranque de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones andinoamazónicas.https://www.researchgate.net/publication/305196480_Arranque_de_un_Reactor_UASB_para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Domesticas_en_Condiciones_Andino_Amazonicas
- Beatriz, R. P. (2007). Contaminación por nitratos y nitritos en pozos de Puente Grande y El Salto, Jalisco, México.
- Berlanga Clavijo, J. G., Martínez Cuenca, R., & Climent, J. (2018). Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia.
- Caldera, Y. A., Madueño, P. I., Griborio, A. G., Gutiérrez, E. C., & Fernández, N. M. (2003). Efecto del tiempo de retención hidráulica en el funcionamiento de un reactor UASB tratando efluentes cárnicos. *Multiciencias*, 3(1).
- Cárdenas, R., & Isabel, M. (2022). Sistema inteligente para predecir el desgaste de cangilones de turbinas Pelton mediante el protocolo MQTT y redes neuronales (Tesis de maestría, Quito, Ecuador: Universidad Tecnológica Israel).
- Castro Olarte, J. (2018). Evaluación de la remoción de materia orgánica en un reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Huancavelica.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño – CORPONARIÑO, Secretaría de Gestión y Saneamiento Ambiental, Alcaldía de Pasto, Empresa de Servicios Públicos de Pasto EMPOPASTO S.A. E.S.P y Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales

Naturales - UAESPNN. (2011). Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Pasto. San Juan de Pasto, 450 p.

Fernández Sánchez, M. (2014). Fonts hidrotermals oceàniques: adaptacions dels microorganismes hipertermòfils.

Flores Alés, V. (2015). Construir con agua Lección inaugural de la ETS de Ingeniería de Edificación. Universidad de Sevilla. Curso Académico 2013-2014.

Flores Paltán, F. G., & Velín Sagbay, J. P. (2014). Diseño y construcción de un BIORREACTOR bioreactor anaerobio en fase líquida para tratar aguas residuales de curtiembre (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Franke-Whittle, I., Walter, A., Ebner, C., & Insam, H. (2014). Investigation into the effect of high concentrations of volatile fatty acids in anaerobic digestion on methanogenic communities. *Waste Management*, 34(11), 2080-2089. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.020>.

García, K. L. Q., Zúñiga, D. P. R., Duque, M. E. G., & Rojas, J. A. A. (2021). Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. *Ingeniería y Región*, (25), 82-94.)

Gonzalez Hoyos, N. D. J. (2017). Arranque de un reactor anaerobio de flujo ascendente para el tratamiento de una corriente de lixiviados proveniente de un reactor UASB (Doctoral dissertation).

Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Ceballos-Peñaloza, A. M. (2018). Actualidad del sistema productivo tradicional de panela en Colombia: análisis de mejoras y alternativas tecnológicas. *Ingeniería y Competitividad*, 20(1), 107-123.

- Hudayah, N., Krainara, S., Kongduan, V., Chaiprasert, P., & Suraraksa, B. (2021). Efficiencies of anaerobic hybrid and uasb reactors to alleviate the adverse effect of elevated salinity in wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 96(12), 3426-3435. <https://doi.org/10.1002/jctb.6906>
- Jaimes-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., ... & Hernández, H. (2020). Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: complete performance evaluation and microbiological population. *Energies*, 14(1), 151. <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Knobelsdorf Miranda, J. (2005). Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Loaiza, D. (2022). Optimización de un sistema de tratamiento mediante ensayos de tratabilidad para la remoción de materia orgánica en aguas residuales de alta complejidad. *Ingenierías Usbmed*, 13(1), 46-55. <https://doi.org/10.21500/20275846.4741>
- Maya González, J. A. (2020) Evaluación de sistemas biológicos de lecho fijo para el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de la ciudad de San Juan de Pasto (Nariño). Proyecto de grado como requisito para optar al título de magister en desarrollo sostenible y medio ambiente. Universidad de Manizales.
- Méndez-Ortiz, B. A., Carrillo-Chávez, A., Monroy-Fernández, M. G., & Levresse, G. (2012). Influencia del pH y la alcalinidad en la adsorción de As y metales pesados por oxihidróxidos de Fe en jales mineros de tipo skarn de Pb-Zn-Ag. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(3), 639-648.
- Montera-Vega, F. S., Molina-Cedeño, C. S., Pillco-Herrera, B. M., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. caso río pindo chico, puyo, pastaza, ecuador. *Ciencia, Ambiente Y Clima*, 3(1), 23-39. <https://doi.org/10.22206/cac.2020.v3i1.pp23-39>

Morán, M. (2015). Agua y saneamiento. Desarrollo Sostenible. Available online: [<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>] (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>) (accessed on 28 December 2021).

Orozco Gaviria, C. A., Triviño Cabrera, C. C., & Manrique Losada, L. (2014). Arranque de un Reactor UASB para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Condiciones Andino Amazónicas. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 10(2), 170–185. <https://doi.org/10.18359/rfcb.328>

Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372012000200010

Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Pasto. Corporación Autónoma Regional de Nariño – CORPONARIÑO, Secretaría de Gestión y Saneamiento Ambiental, Alcaldía de Pasto, Empresa de Servicios Públicos de Pasto EMPOPASTO S.A. E.S.P y Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales - UAESPNN. (2011). San Juan de Pasto, 450 p.

PureWater Colombia S.A.S. (s.f.). Recuperado de <https://purewater.com.co/que-es-el-ph-del-agua/>

Pullés, M. R. (2014). Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 45(1), 25-36.

Pulido, S., Bojacá, C. R., Salazar, M., & Chaves, B. (2008). Modelo de aparición de nodos para Lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en el trópico de gran altitud. *Ingeniería de Biosistemas*, 101(4), 383-387.

Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf

Reactores aerobios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna: caracterización hidrodinámica y del soporte. Recuperado de Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (56), 68-77.

Ríos Tatiana (2023). Formulación del programa de uso eficiente y ahorro del agua (PUEAA) para un Acueducto Comunitario del Sistema Chingaza. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10901/25285>.

Sánchez Ortiz, I. A., Teixeira Correia, G., Santos de Araújo, L., Gebara, D., Dall'Aglio Sobrinho, M., & Matsumoto, T. (2010). Reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna: caracterización hidrodinámica y del soporte. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (56), 68-77.

Sánchez Vásquez, V. L. (2022). Calidad de Aguas Superficiales para el Riego de Cultivos Agrícolas en las cuencas del Río San Pablo, Provincia de Los Ríos (Tesis de maestría).

Salazar-Larrota, L., Uribe-García, L., Gómez-Torres, L., & Zafra-Mejía, C. (2019). Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. *Dyna*, 86(209), 319-326.

Santacruz Bastidas, D. L. (2019). Evaluación de la calidad del agua por vertimientos de aguas residuales en la zona media y baja de la quebrada Miraflores de Pasto-Nariño.

Silva Vargas, I. L. (2023). Análisis fisicoquímico del agua en la vereda la lajita Tunja Según Resolución 2115 Del 2007.

Torres, P. (2013). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo (Perspectives of anaerobic treatment of domestic wastewater in developing countries). *Revista EIA*, 9(18), 115–129. Recuperado a partir de <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/264>

Tratamiento biológico de aguas residuales en reactor anaerobio de flujo ascendente de empresa productora de grenetina. Recuperado de https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Tecnologias_en_Procesos_Industriales/vol3_num7/Revista_de_Tecnolog%C3%ADas_en_Procesos_Industriales_V3_N7_4.pdf

Yépez Peralta, M. F., & Quinto Yépez, M. D. (2018). Evaluación de la demanda bioquímica de oxígeno con un reactor aeróbico secuencial discontinuo de aguas residuales domésticas (Tesis de licenciatura, Guayaquil: ULVR, 2018).

Anexos

Anexo A. Presupuesto

Rubro	Justificación	Universidad Mariana		Valor total
		Efectivo	Especie	
Transporte	La investigación se realizará en la sede Alvernia, el costo estimado de transporte es de seis mil pesos, en ida y regreso. Por semana se subirán 2 veces a la sede, contando que el grupo es de 3 integrantes y la duración de la investigación es de doce meses	1.728.000		1.728.000
Materiales	Repuestos para el reactor (tornillos, tubos, recipientes, elementos bioseguros, material de muestreo)	500.000		500.000
Laboratorios	Análisis de muestras, preparación de agua residual, acondicionamiento. Se realizarán aproximadamente 24 laboratorios, cada laboratorio tiene un costo aproximado de trescientos mil pesos.	7.200.000		7.200.000
Recursos humanos	Las horas de asesoría son los días lunes, con una duración de una hora. en el mes serían 4 horas. El tiempo estimado es de 12 meses.	1.680.000		1.680.000

Eventos	Socialización de resultados.	500.000			500.000
Total		500.000	8.880.000	2.228.000	11.608.000
