



Diseño de sistemas de tratamientos de aguas residuales domesticas (S. T. A. R. D) para las casas residenciales de las granjas avícolas de la empresa Pollo Coa en el departamento de Antioquia

Esteban Mosquera Álvarez

Ingeniero Bioquímico

Asesores

Dalma Elizabeth Marsiglia López, Magíster (MSc) en Ingeniería Química
Gamalyel Ramírez Porras, Especialista (Esp) en Agua potable y Saneamiento básico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Pregrado Ingeniería Bioquímica
Seccional Carmen de Viboral
2022

Dedicatoria

Primero a Dios todo poderoso por darnos esos regalos llamados vida, salud, sabiduría, el entendimiento y la paciencia necesaria de haber llegado hasta este punto cumpliendo con todos los objetivos de este proyecto. A mis padres y mi familia quienes me han acompañado en este viaje, a todos ellos gracias por todo el amor incondicional y la confianza para lograr grandes metas.

Agradecimientos

Primeramente, gracias a Dios, a mis padres, a mis hermanos, la universidad de Antioquia, a mis profesores, mis asesores, mis coordinadores de programa y a mis compañeros y a todas las personas que intervinieron e hicieron acompañamiento a lo largo de cada etapa de este proceso por sus enseñanzas, conocimiento y colaboración. Agradecimientos especiales a Ingenius Consulting Group S.A.S, al señor Gamalyel Ramírez y a todo el equipo de la empresa, quienes me brindaron su apoyo, acompañamiento y constante colaboración en lo necesario para la elaboración del presente proyecto.

Tabla de contenido

Lista de Tablas	6
Lista de Figuras	¡Error! Marcador no definido.
Lista de Fotografías	¡Error! Marcador no definido.
Lista de Gráficas	¡Error! Marcador no definido.
Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Marco teórico	14
3.1 Marco legislativo	14
Tabla 1. Leyes Colombianas del medio ambiente.	14
3.2 Marco conceptual:	14
3.2.1 Microbiología anaerobia	14
3.2.1.1 Hidrolisis	15
3.2.1.2 Acidogénesis	16
3.2.1.3 Acetogénesis	17
3.2.1.4 Metanogénesis	17
3.2.1.5 Sulfato reducción	18
3.2.1.6 Biogás	18
3.2.2 Factores que intervienen en el proceso	19
3.2.2.1 pH	19
3.2.2.2 Temperatura	20

3.2.3 Sistemas de tratamiento anaeróbico	21
3.2.3.1 Reactores anaeróbicos de flujo ascendente para lodos (UASB)	22
3.2.3.1.1 Criterio de diseño	24
3.2.3.1.2 Carga hidráulica volumétrica y tiempo de retención hidráulica	25
3.2.3.1.3 Velocidad de flujo ascendente y altura del reactor	25
3.2.4 Caudal de diseño	26
3.2.4.1 Caudal de aguas residuales domésticas (QD):	26
3.2.4.2 Caudal medio diario de aguas residuales (QMD):	28
4 Metodología	29
4.1 Diagnóstico inicial de las granjas avícolas para los reactores UASB:	31
4.2 Análisis físico químico de los parámetros reportados del agua residual	31
4.3 Diseño de Reactores anaerobios de flujo ascendente	32
4.3.1 Metodología de diseño	32
4.3.2 Metodología propuesta para el diseño de un Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).	33
5. Análisis y Resultados	37
5.1 Diagnóstico inicial.	37
5.2 Análisis fisicoquímico de los parámetros reportados por el laboratorio de Acuazul	38
6. Conclusiones	46
7. Recomendaciones	47
Referencias	48
Anexos	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Criterios de diseño de reactores UASB.....	24
Tabla 2. Coeficientes de retorno de aguas residuales domesticas	27
Tabla 3. Demanda neta por habitante según el nivel de complejidad del sistema.	28
Tabla 4. Criterios de diseño para un reactor anaerobio de flujo ascendente	32
Tabla 5. Diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente propuesto para la granja avícola Medellín.....	33
Tabla 6. Diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente propuesto para la granja avícola Aljibes.	34
Tabla 7. Comparación de los análisis de laboratorio con respecto a la resolución en la granja avícola Medellín	37
Tabla 8. comparación de los análisis de laboratorio con respecto a la resolución en la granja avícola Aljibes.....	38
Tabla 9. Análisis de DBO5 en el reactor de la granja avícola Medellín.	39
Tabla 10. Análisis de DQO en el reactor de la granja avícola Medellín.	39
Tabla 11. Análisis de DBO5 en el reactor de la granja avícola aljibes.	39
Tabla 12. Análisis de DQO en el reactor de la granja avícola aljibes.	40

Lista de Figuras

Figura 1. Vías metabólicas y grupos microbianos implicados en la digestión anaerobia	15
Figura 2. Clasificación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.	22
Figura 3. Dibujo esquemático de un reactor UASB	24
Figura 4. Proceso metodológico del proyecto.....	30
Figura 5. Comparación de la DQO en el afluente y el efluente en el reactor UASB de 3,300 Lt a través del tiempo para la granja avícola Medellín.....	40
Figura 6. Comparación de la DQO en el afluente y el efluente en el reactor UASB a través del tiempo para la granja avícola Aljibes	41
Figura 7. Porcentaje de eficiencia en el reactor UASB de 3,300 Lt para la DQO a través del tiempo para la granja avícola Medellín.	42
Figura 8. Porcentaje de eficiencia en el reactor UASB de 2000 Lt para la DQO a través del tiempo para la granja avícola Aljibes	42
Figura 9. Comparación de la DBO en el afluente y el efluente en el reactor UASB de 3,300 Lt a través del tiempo para la granja avícola Medellín.....	43
Figura 10. Comparación de la DBO en el afluente y el efluente en el reactor UASB a través del tiempo para la granja avícola Aljibes.	44
Figura 11. Porcentaje de Remoción en el reactor UASB de 3,300 Lt para la DBO5 a través del tiempo para la granja avícola Medellín.	45
Figura 12. Porcentaje de Remoción en el reactor UASB de 2000 Lt para la DBO5 a través del tiempo para la granja avícola Aljibes	45

Siglas, acrónimos y abreviaturas

OD	Oxígeno disuelto.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DQO	Demanda Química de Oxígeno.
SST	Sólidos suspendidos totales.
UASB	Up flow anaerobic sludge blanket.
RAFA	Reactor anaerobio de flujo ascendente.
QMD	Caudal medio diario de aguas residuales.
QD	Caudal de aguas residuales doméstico.

Resumen

Las casas residenciales de las granjas avícolas de la empresa Pollo COA, no cuentan con un tren de tratamiento para las aguas residuales que se generan, las cuales llegan a las fuentes hídricas y se desconoce si el efluente cumple con los criterios de calidad y parámetros permisibles en la resolución 0631 de 2015 expedida por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

Por ese motivo, el objetivo de este proyecto fue desarrollar y diseñar de un sistema de tratamiento para las casas residenciales de las granjas avícolas de la empresa Pollo COA, se espera que, con la implementación de las unidades diseñadas, se haya logrado una remoción de carga contaminante en los reactores UASB y que se obtuvieron ciertos porcentajes de eficiencia del 61% para la DQO y 68% para DBO, de manera que el efluente cumplió con los criterios de calidad necesarios para su vertimiento. Además, que se demostró que en el poco tiempo de la puesta en marcha y con un tiempo de retención hidráulica de 5 horas, en el mes 5 se observó una estabilización de los porcentajes de eficiencia.

En la última etapa, la etapa de análisis, se evaluaron dentro de 5 meses los principales parámetros los cuales son la DQO y la DBO, sin descuidar los parámetros de control para evitar una desestabilización del sistema. Las cuales se realizaron un análisis comparativo entre el afluente del reactor y el efluente.

Palabras claves: Biodegradación, digestión anaeróbica, reactor UASB, oxígeno disuelto, biogás, efluentes domésticos.

Abstract

The residential houses of the poultry farms of the Pollo COA company do not have a treatment train for the wastewater that is generated, which reaches the water sources and it is unknown if the effluent meets the quality criteria and permissible parameters. in resolution 0631 of 2015 issued by the Ministry of Environment and Sustainable Development.

For this reason, the objective of this project was to develop and design a treatment system for the residential houses of the poultry farms of the Pollo COA company, it is expected that, with the implementation of the designed units, a removal of contaminant load in the UASB reactors and certain efficiency percentages of 61% for COD and 68% for BOD were obtained, so that the effluent met the quality criteria necessary for its discharge. In addition, it was shown that in the short time of start-up and with a hydraulic retention time of 5 hours, in month 5 a stabilization of the efficiency percentages was observed.

In the last stage, the analysis stage, the main parameters, which are COD and BOD, were evaluated within 5 months, without neglecting the control parameters to avoid system destabilization. Which a comparative analysis was carried out between the influent of the reactor and the effluent.

Keywords: Biodegradation, anaerobic digestion, UASB reactor, dissolved oxygen, biogas, and domestic effluents.

1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos y necesarios en el planeta, no solo es indispensable para la vida sino también se necesita para diversas actividades productivas y cotidianas. No obstante, el agua disponible para consumo humano constituye una fracción muy pequeña de toda el agua del planeta. Por otro lado, toda el agua del planeta es constantemente reciclada y purificada por medio del ciclo del agua, sin embargo, este proceso de purificación no es suficiente hoy en día para mantener el agua apta para su uso posterior (Santiago et al., 2016).

El tratamiento de las aguas residuales es un asunto que no ha recibido la debida importancia en la mayoría de los países latinoamericanos, debido a que las autoridades ambientales competentes son muy permisivas en cuanto al vertimiento de estas aguas a los cuerpos receptores. Si bien en los últimos años la inversión en los sistemas de tratamiento de aguas residuales ha aumentado, aún se mantiene un atraso de varios años en Latinoamérica (Juan Sebastián et al., 2015).

La materia orgánica contenida en las capas de lodo y espuma es descompuesta por bacterias anaerobias, y una parte considerable de ella se convierte en agua y gases. Los lodos que ocupan la parte inferior del tanque séptico se compactan debido al peso del líquido y a los sólidos que soportan. Por ello su volumen es mucho menor que el de los sólidos contenidos en las aguas servidas no tratadas que llegan al tanque. Las burbujas de gas que suben a la superficie crean cierta perturbación en la corriente del líquido. La velocidad del proceso de digestión aumenta con la temperatura, con el máximo alrededor de los 35°C. El empleo de desinfectantes en cantidades anormalmente grandes hace que mueran las bacterias, inhibiendo así el proceso de digestión (Anda et al., 2016).

En los últimos años ha habido un creciente interés en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales. En comparación con el crecimiento aeróbico, la fermentación anaeróbica produce mucha menos biomasa a partir de la misma cantidad de eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) (Tchobanoglous, et al., 2004). El reactor de capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) es un reactor anaeróbico popular tanto para alta como para baja temperatura (Dinsdale, et al., 2004). El reactor UASB es, con diferencia, el sistema anaeróbico de alta velocidad más utilizado para el

tratamiento anaeróbico de aguas residuales. En el caso de aguas residuales de fuerza relativamente baja, como las aguas residuales, el tiempo de retención hidráulica en lugar de la tasa de carga orgánica es el parámetro más importante que determina la forma y el tamaño del reactor UASB. Las diversas características favorables de los procesos anaeróbicos, tales como bajo costo, simplicidad operativa, baja producción de biosólidos y considerable producción de biogás, junto con condiciones ambientales adecuadas, han contribuido a resaltar los sistemas anaeróbicos para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades de regiones tropicales (Azimi & Zamanzadeh, 2004).

El UASB es un tipo de reactor anaeróbico bien aceptado para el tratamiento de aguas residuales, así como aguas residuales industrial de baja y alta resistencia. El éxito de la eliminación de la alta DQO ha llevado a su creciente aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales domésticas, especialmente en condiciones climáticas mediterráneas (Castillo et al., 2007.). La eliminación de materias orgánicas es razonablemente buena; especialmente para el carbono orgánico biodegradable, lo que hace innecesario el tratamiento complementario en muchos casos (Schellinkhout y Osorio, 1994) (Bhunja & Ghangrekar, 2008).

En este trabajo, se realizará el diseño y se determinaran las condiciones operativas de los Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA), para las granjas avícolas de pollo COA de las cuales, la granja avícola Aljibes se encuentran en el municipio de Amaga y la granja avícola Medellín se encuentra ubicada en el corregimiento de san Antonio de prado en el municipio de Medellín, en el departamento de Antioquia sabiendo que los RAFA construidos en cada granja avícola tienen dimensiones diferentes, bien sea por la cantidad de población y el caudal medio diario que estos generen.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas (STARD) para las casas residenciales de las granjas avícolas de la empresa Pollo COA.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la capacidad de almacenamiento requerida de los S.T.A.R.D para las residencias de las granjas avícolas de la empresa Pollo COA.
- Establecer las características fisicoquímicas y biológicas de los agares microbiológicos necesarios para los S.T.A.R.D.
- Comparar la calidad del efluente del S.T. A. R. D con la normatividad ambiental vigente en materia de descargas.

3. Marco teórico

3.1 Marco legislativo

A lo largo del desarrollo del proyecto, se tuvieron en cuenta las siguientes normatividades en la tabla 1.

Tabla 1. Leyes Colombianas del medio ambiente.

Norma	Expedido por	Artículo	Relación
Constitución Política de Colombia	Asamblea Nacional Constituyente	Artículos 8, 79, 80	Señalan que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.
Resolución 0631 de 2015	El Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Artículos 2, 3, 8	Establece parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas
RAS 2000 Titulo B (2016)	Ministerio de Desarrollo Económico Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico.		Por medio del cual se señalan los parámetros de dotación y demanda en cuanto a caudales promedio
RAS 2000 Titulo D (2014)	Ministerio de Desarrollo Económico Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico		Por medio del cual se señalan los parámetros de diseño, operación y control para los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas.

Fuente: Autor.

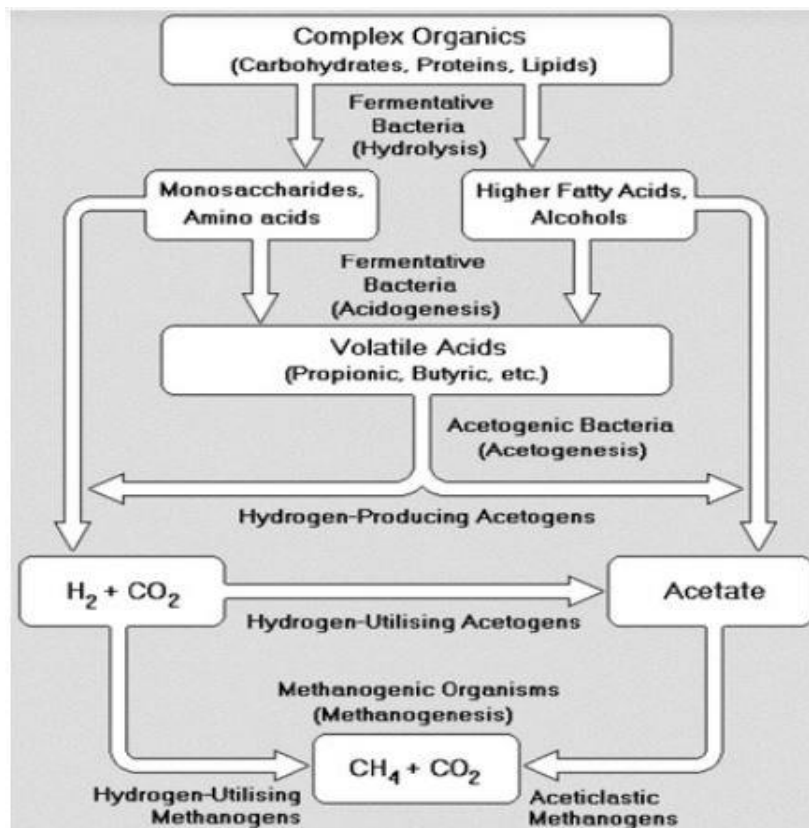
3.2 Marco conceptual:

3.2.1 Microbiología anaerobia

La digestión anaerobia (Figura 1) es un proceso microbiológico complejo que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica (carbohidratos, proteínas y lípidos) es transformada en biomasa y compuestos orgánicos de cadena más simple (Chernicharo, 2007). Se ha identificado

que este proceso de degradación es llevado a cabo por una comunidad de distintas especies de bacterias, con funciones específicas en las reacciones secuenciales que se dan, por lo que se considera como una asociación sintrófica. La ruta de degradación se ha delimitado en cuatro etapas definidas como: hidrólisis, acidogénesis, Acetogénesis y metanogénesis (López Vázquez et al., 2017).

Figura 1. Vías metabólicas y grupos microbianos implicados en la digestión anaerobia



Nota: adaptado de: Lettinga et al. (1996).

3.2.1.1 Hidrolisis

La hidrólisis es un proceso de solubilización de compuestos orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) en moléculas más simples y pequeñas (monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga) (Qasim, 2017). Dicho proceso es efectuado por exo-enzimas excretadas por las bacterias fermentativas hidrolíticas, ya que los microorganismos no son capaces de asimilar la materia orgánica particulada (Sperling & Chernicharo, 2005). Los compuestos hidrolizados

pueden pasar a través de la pared y membrana celular de las bacterias, para ser aprovechadas como fuente de energía y carbono celular (Metcalf, 2007).

Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas los géneros más frecuentes, que llevan a cabo esta reacción son miembros de la familia Enterobacterias (Díaz-Báez, 2002).

3.2.1.2 Acidogénesis

Los compuestos de bajo peso molecular -resultado de la hidrólisis- son aprovechados por un grupo de microorganismos fermentativos que son anaerobios facultativos y obligados, llamados acetógenos o formadores de ácidos (Qasim, 2017). En este proceso, son convertidos en moléculas simples como ácidos grasos volátiles de cadena corta, alcoholes, acetato, ácido láctico, CO_2 , H_2 , NH_3 y H_2S . Los resultados finales y el tipo de producto derivado, dependerá de las condiciones en las que se encuentre el medio del reactor; para las reacciones acidogénicas menos favorables energéticamente, dependerán fuertemente de las concentraciones de hidrógeno, si éste se remueve eficientemente por organismos consumidores como metanógenos, el acetato será el principal producto final, pero si este se retrasa se acumulará H_2 (López Vázquez et al., 2017), lo que dificulta la descomposición anaerobia. Hay un límite termodinámico de concentración máxima permisible, que se mide en términos de la ley de Henry, en la cual la presión parcial de hidrógeno debe estar por debajo de 4-10 atm (Orozco Jaramillo Alvaro, 2014).

La Acidogénesis es la etapa de conversión más rápida en la cadena trófica anaerobia, dando como resultado velocidades de crecimiento de las bacterias diez o veinte veces más altas, y rendimientos de las bacterias y velocidades de conversión, cinco veces más altos comparados con las reacciones metanogénicas. Por esa razón, los reactores anaerobios son susceptibles a la acidificación, es decir, a repentinas caídas de pH, cuando existen sobrecargas en los reactores o perturbaciones por compuestos tóxicos. Una vez que se ha consumido la alcalinidad por los ácidos producidos, el pH comienza a bajar, resultando en concentraciones más altas de ácidos grasos volátiles (AGV) no disociados, y generando una inhibición más severa de los metanógenos. Esto último, obviamente

conduce a una acumulación más rápida de AGV, y subsecuentemente, a una caída de pH (López Vázquez et al., 2017).

3.2.1.3 Acetogénesis

Las bacterias acetogénicas son las responsables de la oxidación de los productos generados en la fase acidogénica, a un sustrato más apropiado para los microorganismos metanogénicas, ya que estos solo pueden transformar en metano, el hidrogeno y el acetato (Sperling & Chernicharo, 2005). Algunos estudios realizados han dilucidado la estrecha relación entre bacterias acetogénicas productoras de H₂, y arqueobacterias metanogénicas consumidoras de H₂, regulando los niveles de hidrógeno en el medio; bajo condiciones estables de digestión la presión parcial del hidrogeno se mantiene por debajo de 4-10 atm, lo que es suficiente para asegurar que se lleve a cabo la producción de acetato (López Vázquez et al., 2017).

3.2.1.4 Metanogénesis

El grupo de las arqueobacterias metanogénicas se encargan de reducir el dióxido de carbono, utilizando el hidrógeno como donador de electrones y de descarboxilar el acetato para formar metano, es únicamente en esta etapa cuando la DQO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) del afluente se convierte a una forma gaseosa que abandona el reactor automáticamente, los metanógenos se clasifican en dos grandes grupos: los metanógenos acetoclasticas que generan el 70% del metano que se produce a partir de acetato como principal precursor. Su tasa de crecimiento es muy baja resultando en tiempos de duplicación de varios días; y los otros microorganismos son los metanógenos hidrogenotróficos que generan directamente el metano a partir del hidrógeno (Sperling & Chernicharo, 2005). Estas bajas velocidades de crecimiento explican por qué los reactores anaerobios requieren un periodo de puesta en marcha muy largo, sin embargo, el grupo hidrogenotrófico tiene una velocidad de crecimiento mucho más rápida, con tiempos de duplicación de 4 a 12 horas (López Vázquez et al., 2017).

3.2.1.5 Sulfato reducción

Las aguas residuales, que contienen un exceso de donadores de electrones orgánicos con respecto a la cantidad de nitrato, nitrito, sulfato o sulfito, pueden ser utilizados por bacterias de sulfato reductoras como aceptores de electrones (Díaz-Báez, 2002).

Una característica de los medios donde los sulfatos reductores desarrollan una alta actividad metabólica, es la presencia de olores desagradables producidos por el H_2S , así como el color negro en las aguas y los sedimentos. Debido a la formación de sulfuros que se precipitan al reaccionar con diferentes metales, estos microorganismos pueden crecer en presencia o ausencia de sulfatos en el afluente, ya que pueden usar otras rutas metabólicas (Metcalf, 2007). Como consecuencia a que la solubilidad del H_2S es mucho más alta que la del CH_4 , se tendrá una remoción de DQO considerablemente más baja en la fase líquida (López Vázquez et al., 2017).

En presencia de sulfatos, las bacterias sulfato reductoras son capaces de oxidar compuestos orgánicos e hidrógenos, compitiendo con las bacterias metanogénicas, generando la inhibición de las bacterias acetoclasticas, ya que los ácidos grasos como el propionato y el butirato son oxidados completamente a CO_2 o parcialmente hasta acetato (Díaz-Báez, 2002).

3.2.1.6 Biogás

La composición del biogás producido a partir de la digestión anaeróbica varía según la composición del sustrato, ya que un alto contenido en carbohidratos resultara con un contenido de metano bajo y un contenido de CO_2 alto en la producción total de biogás, mientras, que, si se tiene un sustrato con un contenido de proteínas y lípidos altos, el rendimiento teórico de metano aumentaría; el rendimiento se estima en 0,37, 1,0 y 0,58 m^3 de CH_4 por kg de materia orgánica respectivamente. La generación de metano a partir de procesos anaeróbicos es proporcional a la disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) de los residuos o lodos. El valor de DQO del gas metano es 4 gDQO/g CH_4 , a temperatura y presión estándar (20 °C y 1 atm de presión), esto corresponde a 0,35 m^3 de CH_4 producido/kg DQO eliminado (Caye M. Drapcho, 2020)

Generalmente los procesos anaerobios son más eficientes energéticamente para aguas residuales con concentraciones mayores a 300 mg DBO/L, esto se debe a que, en estas condiciones, la fracción producida disuelta en el efluente se vuelve insignificante en relación con la producción total de metano (Water Environment Federation., 2017).

3.2.2 Factores que intervienen en el proceso

Los procesos microbiológicos necesitan de unas condiciones específicas que adecuan su entorno, para que el desarrollo sea adecuado y su desempeño en la degradación de la materia orgánica sea eficiente, a continuación, se detallan los parámetros más relevantes (López Vázquez et al., 2017; Sperling & Chernicharo, 2005).

3.2.2.1 pH

La actividad enzimática en las células permite que se desarrolle el metabolismo bacteriano, y finalmente, es el hecho por el cual nos valemos en el tratamiento de aguas residuales al usar tecnologías biológicas. Diversos estudios han mostrado que cambios extremos en el pH pueden afectar gravemente la estructura proteica de las enzimas, llegando a inactivar o incluso a desnaturalizar (Montoya Villafane, 2008). Por tal razón, no se logra el aprovechamiento del sustrato para la obtención de energía y formación de biomasa, esto se resume en una situación indeseada para un reactor o filtro anaerobio (M von SPERLING, 1996).

El pH en la digestión anaerobia está en función de la producción de ácidos grasos volátiles (AGV), y de la alcalinidad presente en el medio, un aumento en la concentración de AGV que sobrepase la capacidad de consumo de ellos por los microorganismos que los pueden aprovechar, se traduce en una acumulación en el medio, lo que conduce a la inhibición de las bacterias metanogénicas hidrogenófilas, acumulando el H₂ e inhibiendo a las bacterias metanogénicas acetoclasticas, con lo que se abre la posibilidad de la acidificación del proceso sin oportunidad de retorno (Padilla., 2010).

Para que el proceso se desarrolle de forma adecuada, el pH debe estar entorno a la neutralidad; un intervalo aceptable es de 6 a 8,3 unidades de pH. A pesar de la importancia de llevar un control de este parámetro en la operación de filtros anaerobios, no se considera una herramienta adecuada, dado que la digestión anaerobia resulta ser muy lenta y cuando se logra identificar una variación considerable en el pH, ya puede ser tarde para tomar medidas correctivas, y la acidificación del sistema se torne irreversible. En consecuencia, se recomienda la medición de otros parámetros como la concentración de AGV y la alcalinidad (Díaz-Báez, 2002).

3.2.2.2 Temperatura

Es un factor determinante y que se debe tener en cuenta a la hora de elegir y diseñar cualquier sistema biológico en particular. Para el tratamiento anaerobio se han identificado dos rangos de operación, el mesofílico (25 a 40°C) con un óptimo de operación de 35 °C y el proceso termófilo que opera en un intervalo de (50 a 65°C) (Comisión Nacional de Aguas., 2019). La temperatura está estrechamente relacionada con la actividad metabólica de los microorganismos, la tasa de transferencia de gases, las características de sedimentación de los sólidos biológicos y las tasas de reacción química. Esto termina influyendo en parámetros de diseño como el tiempo de retención y la aplicación de cargas orgánicas. (Comisión Nacional de Aguas., 2019).

El régimen mesofílico es el más usado en procesos de digestión anaerobia, a pesar de que en el régimen termófilo permite conseguir mejores eficiencias, el sentido de esto es que tiende a hacer del proceso anaerobio más inestable a cualquier cambio en las condiciones de operación; por ejemplo, la inhibición microbiológica causada por la toxicidad de algunos compuestos, (Padilla., 2010) ,sin embargo, el operar un filtro bajo condiciones termófilas, ofrece ventajas muy provechosas como una mayor producción de gas por unidad de sólidos volátiles, se favorece la eliminación de un buen porcentaje de virus y bacterias patógenas, además de una separación sólido – líquido más rápida al disminuir la viscosidad de la solución (Córdova Mosquera, 2019).

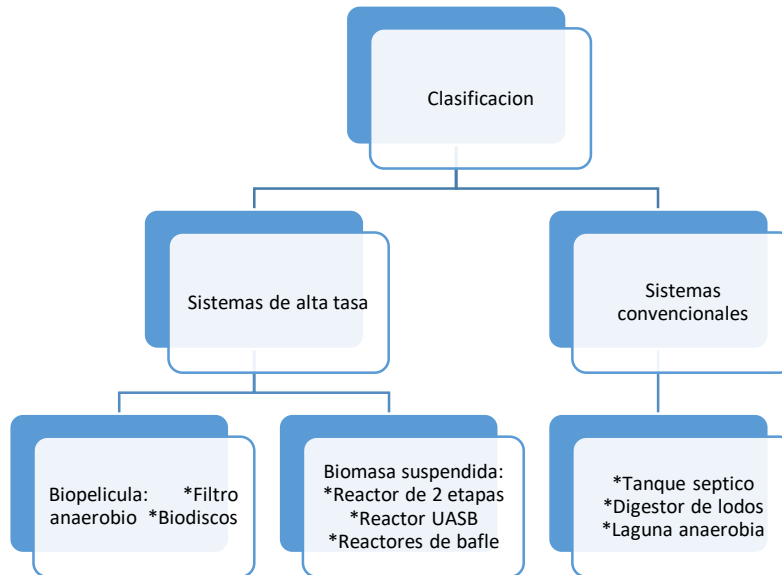
3.2.3 *Sistemas de tratamiento anaeróbico*

La esencia de los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales reside en la capacidad de los microorganismos involucrados para utilizar los compuestos orgánicos biodegradables y transformar en los subproductos que puedan ser eliminados del sistema de tratamiento. Los subproductos formados pueden ser sólidos (lodos biológicos), líquidos (agua) o forma gaseosa (dióxido de carbono, metano, etc.). En cualquier proceso utilizado, aeróbico o anaeróbico, la capacidad de aprovechamiento de los compuestos orgánicos dependerá de la actividad microbiana de la biomasa presente en el sistema. Hasta hace poco, el uso de procesos anaeróbicos para el tratamiento de efluentes líquidos se consideraba antieconómico y problemático. La reducida tasa de crecimiento de la biomasa anaerobia, especialmente de las *Archaea metanogénicas*, hace que el control del proceso sea delicado, ya que la recuperación del sistema es muy lenta cuando la biomasa anaerobia está expuesta a condiciones ambientales adversas (Sperling & Chernicharo, 2005).

Con la expansión de la investigación en el área del tratamiento anaeróbico, se han desarrollado “sistemas de alta velocidad”. Esencialmente, estos se caracterizan por su capacidad de retener grandes cantidades de biomasa de alta actividad, incluso con la aplicación de bajos tiempos de detención hidráulica. Así, se mantiene un tiempo de retención de sólidos elevado, incluso con la aplicación de cargas hidráulicas elevadas al sistema. El resultado son reactores compactos con volúmenes inferiores a los digestores anaerobios convencionales, pero manteniendo el alto grado de estabilización de los lodos (Sperling & Chernicharo, 2005).

Se describen los sistemas utilizados para el tratamiento de aguas residuales. Por conveniencia, se clasifican en dos grandes grupos, como se muestra a continuación:

Figura 2. Clasificación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.



3.2.3.1 Reactores anaeróbicos de flujo ascendente para lodos (UASB)

El uso de reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas ya es una realidad en países tropicales, especialmente en Brasil, Colombia e India. La experiencia exitosa en estos países es un fuerte indicio del potencial de este tipo de reactores para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Sperling & Chernicharo, 2005).

El proceso anaeróbico a través de reactores UASB presenta varias ventajas en relación a los procesos aeróbicos convencionales, especialmente cuando se aplica en lugares de clima cálido, como la mayoría de los países en desarrollo. El proceso anaeróbico a través de reactores UASB presenta varias ventajas en relación a los procesos aeróbicos convencionales, especialmente cuando se aplica en lugares de clima cálido, como la mayoría de los países en desarrollo (Sperling & Chernicharo, 2005).

- Sistema compacto, con bajos requerimientos de terreno.
- Bajos costos de construcción y operación.
- Baja producción de lodos.

- Bajo consumo de energía (solo para la estación de bombeo del afluente, cuando sea necesario).
- Eficiencias satisfactorias de eliminación de DQO y DBO, que ascienden a 65 a 75%.
- Alta concentración y buenas características de deshidratación del exceso de lodo.

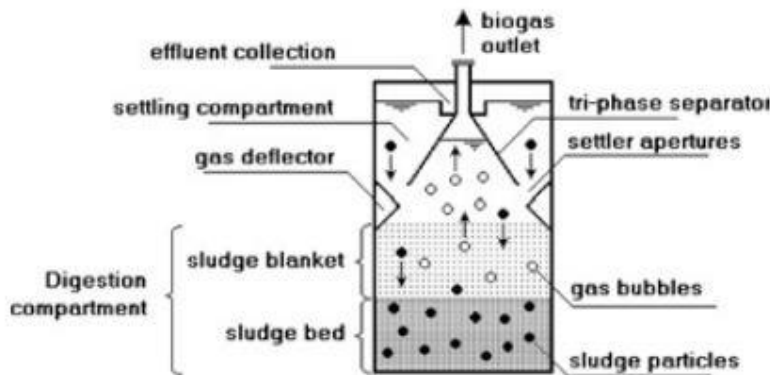
Aunque los reactores UASB presentan muchas ventajas, todavía existen algunas desventajas o limitaciones:

- Posibilidad de liberación de malos olores.
- Baja capacidad del sistema para tolerar cargas tóxicas.
- Largo intervalo de tiempo necesario para la puesta en marcha del sistema.
- Necesidad de una etapa posterior al tratamiento.

En situaciones en las que las aguas residuales son predominantemente domésticas, la presencia de compuestos de azufre y materiales tóxicos suele presentarse en niveles muy bajos, siendo bien manejados por el sistema de tratamiento. Cuando está bien diseñado, construido y operado, el sistema no debe presentar problemas de mal olor y fallas debido a la presencia de elementos tóxicos y/o inhibidores (Sperling & Chernicharo, 2005).

El diseño de los reactores UASB es muy simple y no requiere la instalación de ningún equipo sofisticado o medio de empaque para la retención de biomasa. A pesar del conocimiento acumulado sobre los reactores UASB, todavía no existen pautas claras y sistematizadas accesibles por los diseñadores para el diseño de estos reactores. Es importante que los diversos criterios y parámetros de diseño de los reactores UASB se expresen de manera clara y secuencial, permitiendo dimensionar las cámaras de reacción, sedimentación y captura de gases (Sperling & Chernicharo, 2005).

Figura 3. Dibujo esquemático de un reactor UASB



El reactor se inocula inicialmente con cantidades suficientes de lodos anaerobios y poco después se inicia su alimentación a baja velocidad, en el modo de flujo ascendente. Este período inicial se denomina puesta en marcha del sistema, siendo la fase más importante de la operación del reactor. La velocidad de alimentación del reactor debe incrementarse progresivamente, de acuerdo con el éxito de la respuesta del sistema (Sperling & Chernicharo, 2005).

3.2.3.1.1 Criterio de diseño

Uno de los aspectos más importantes del proceso anaeróbico que aplica reactores UASB es su capacidad para desarrollar y mantener lodos de alta actividad con excelentes características de sedimentación. A continuación, se presentan los principales criterios de diseño de reactores para el tratamiento de residuos orgánicos, tanto de carácter doméstico como industrial. Deben adoptarse criterios específicos para determinados tipos de efluentes industriales teniendo en cuenta la concentración de las aguas residuales afluentes, la presencia de sustancias tóxicas, la cantidad de sólidos inertes y biodegradables y otros aspectos (Sperling & Chernicharo, 2005).

Tabla 1. Criterios de diseño de reactores UASB.

Rango de carga y tipo de biomasa	Criterio de diseño
Alta (aguas residuales industriales) Lodo granular	• Carga orgánica (volumétrica o másica)
Baja (aguas residuales domésticas) Lodo floculante	• Carga hidráulica • THR mínimo.

Fuente: Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions

3.2.3.1.2 Carga hidráulica volumétrica y tiempo de retención hidráulica

La carga hidráulica volumétrica es la cantidad (volumen) de agua residual aplicada diariamente al reactor, por unidad de volumen. El tiempo de detención hidráulica es el recíproco de la carga hidráulica volumétrica.

$$VHL = \frac{Q}{V}$$

Donde:

VHL= carga hidráulica volumétrica (m³/m³·d).

Q= caudal (m³/d).

V= volumen total del reactor (m³).

$$t = \frac{1}{VHL} = \frac{V}{Q}$$

Donde:

t= tiempo de detención hidráulica (d).

3.2.3.1.3 Velocidad de flujo ascendente y altura del reactor

La velocidad de flujo ascendente del líquido se calcula a partir de la relación entre el caudal afluente y la sección transversal del reactor, como sigue:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

v = velocidad de flujo ascendente (m/hora).

Q = caudal (m³/hora).

A = área de la sección transversal del reactor, en este caso el área superficial (m²). O alternativamente, de la relación entre la altura y el THR:

$$v = \frac{Q * H}{V} = \frac{H}{t}$$

Donde:

H = altura del reactor (m).

3.2.4 Caudal de diseño

A la hora de proyectar las instalaciones de tratamiento de las aguas residuales generadas en una comunidad, como punto de partida es fundamental conocer el caudal (Metcalf, 2007). Según el reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (2000) (Potable & Básico, 2016), los caudales deben relacionarse con la población servida, para determinar los aportes de agua residual per cápita proyectados a 25 años.

3.2.4.1 Caudal de aguas residuales domésticas (QD):

Con el fin de llevar a cabo el cálculo del caudal de diseño de aguas residuales domésticas para cada uno de los tramos que conforman la red de alcantarillados de aguas residuales, la demanda de agua potable es vital para calcular dicho caudal de diseño, a través de un coeficiente de retorno. La demanda de agua potable se puede calcular siguiendo una de las tres siguientes metodologías: la proyección de la demanda de agua potable en el sector objeto del diseño; la proyección de los suscriptores en el área objeto del diseño y; en último caso, la proyección de la población en el área objeto del diseño teniendo en cuenta las densidades de saturación. En caso de que se cuente con la proyección de la demanda de agua potable, dentro de las estadísticas de la persona prestadora del servicio público de acueducto del municipio, el caudal de diseño de aguas residuales domésticas se calcula de acuerdo con la ecuación (1) (Potable & Básico, 2016).

$$Q_D = C_R * D_{NETA} * A$$

Donde:

Q_D = Caudal de aguas residuales domesticas (L/s).

C_R = Coeficiente de retorno (adimensional).

D_{NETA} = Demanda neta de agua potable por unidad de área tributaria (L/s*ha).

A = Área tributaria de drenaje (ha).

En caso de que la proyección de la demanda de agua potable se haya hecho haciendo uso de la proyección de los suscriptores del servicio en el área objeto del proyecto del sistema de

alcantarillado, el caudal de diseño de aguas residuales domésticas se calcula de acuerdo con la ecuación (2) mostrada a continuación (Potable & Básico, 2016):

$$Q_D = \frac{C_R * P_S * D_{NETA}}{30}$$

Donde:

Q_D = Caudal de aguas residuales domesticas (m³/día).

C_R = Coeficiente de retorno (adimensional).

D_{NETA} = Demanda neta de agua potable proyectada por suscriptor (m³/suscriptor/mes).

P_S = Número de suscriptores proyectados al periodo de diseño (suscriptores).

Como última opción, en caso de que no existan proyecciones de demanda de agua o proyecciones de suscriptores, el cálculo de caudal de diseño de aguas residuales domésticas se hace utilizando la proyección de población en la zona objeto del diseño. En caso de que se opte por esta última metodología, se debe utilizar la ecuación (3) (Potable & Básico, 2016):

$$Q_D = \frac{C_R * P * D_{NETA}}{86400}$$

Donde:

Q_D = Caudal de aguas residuales domesticas (L/s).

C_R = Coeficiente de retorno (adimensional).

D_{NETA} = Demanda neta de agua potable proyectada por habitante (L/Hab/día).

P = Número de habitantes proyectados al periodo de diseño (Hab).

Tabla 2. Coeficientes de retorno de aguas residuales domesticas

Nivel de Complejidad del sistema	Coeficiente de retorno
Bajo y Medio	0.80
Medio Alto y Alto	0.85

Fuente: RAS 2000.

Se establece la demanda neta de agua potable proyectada por habitante definida por el RAS 2000 Titulo B como “cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un suscriptor o de un habitante” está establecida según el clima y nivel de complejidad en la tabla 4 (Ministerio de Vivienda, 2000).

Tabla 3. Demanda neta por habitante según el nivel de complejidad del sistema.

Nivel de complejidad del sistema	Demanda neta (L/Hab/día) climas templados y fríos	Demanda neta (L/Hab/día) climas cálidos
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

Fuente: reglamento técnico del sector agua potable y saneamiento básico-RAS 2000 Titulo B.

3.2.4.2 Caudal medio diario de aguas residuales (QMD):

El caudal medio diario de aguas residuales (QMD), para un tramo con un área de drenaje dada, es la suma de los aportes domésticos, industriales, comerciales e institucionales (Potable & Básico, 2016).

$$Q_{MD} = Q_D + Q_I + Q_C + Q_{IN}$$

Donde:

Q_{MD} = Caudal medio diario de aguas residuales (m³/s).

Q_D = Caudal de aguas residuales domesticas (m³/s).

Q_I = Caudal de aguas residuales industriales (m³/s).

Q_C = Caudal de aguas residuales comerciales (m³/s).

Q_{IN} = Caudal de aguas residuales institucionales (m³/s).

4 Metodología

Con este proyecto de planteo diseñar y construir un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, con el cual se esperó cumplir con los criterios de diseño y caracterización fisicoquímica del agua. Se debe resaltar que, para haber llegado a esta finalidad, se realizaron varias etapas para determinar de manera más precisa la efectividad y funcionamiento de los modelos.

Con este método se analizó el sistema a utilizar, ya que hay diferentes métodos o procesos de hacerlo. Así mismo se implementan las etapas que son:

Etapas 1: Se hace una visita técnica, donde se realice un monitoreo y análisis del agua que se va a tratar, se calculan ciertos parámetros importantes como la DQO, DBO, SST, PH y el QMD.

Etapas 2: Se verifica y se hace un replanteo manual en el que se formule un lugar apropiado para el sistema de tratamiento.

Etapas 3: Calcular las dimensiones acordes a cada parte del proceso del diseño siguiendo los parámetros establecidos los cuales se evalúan con el caudal de diseño.

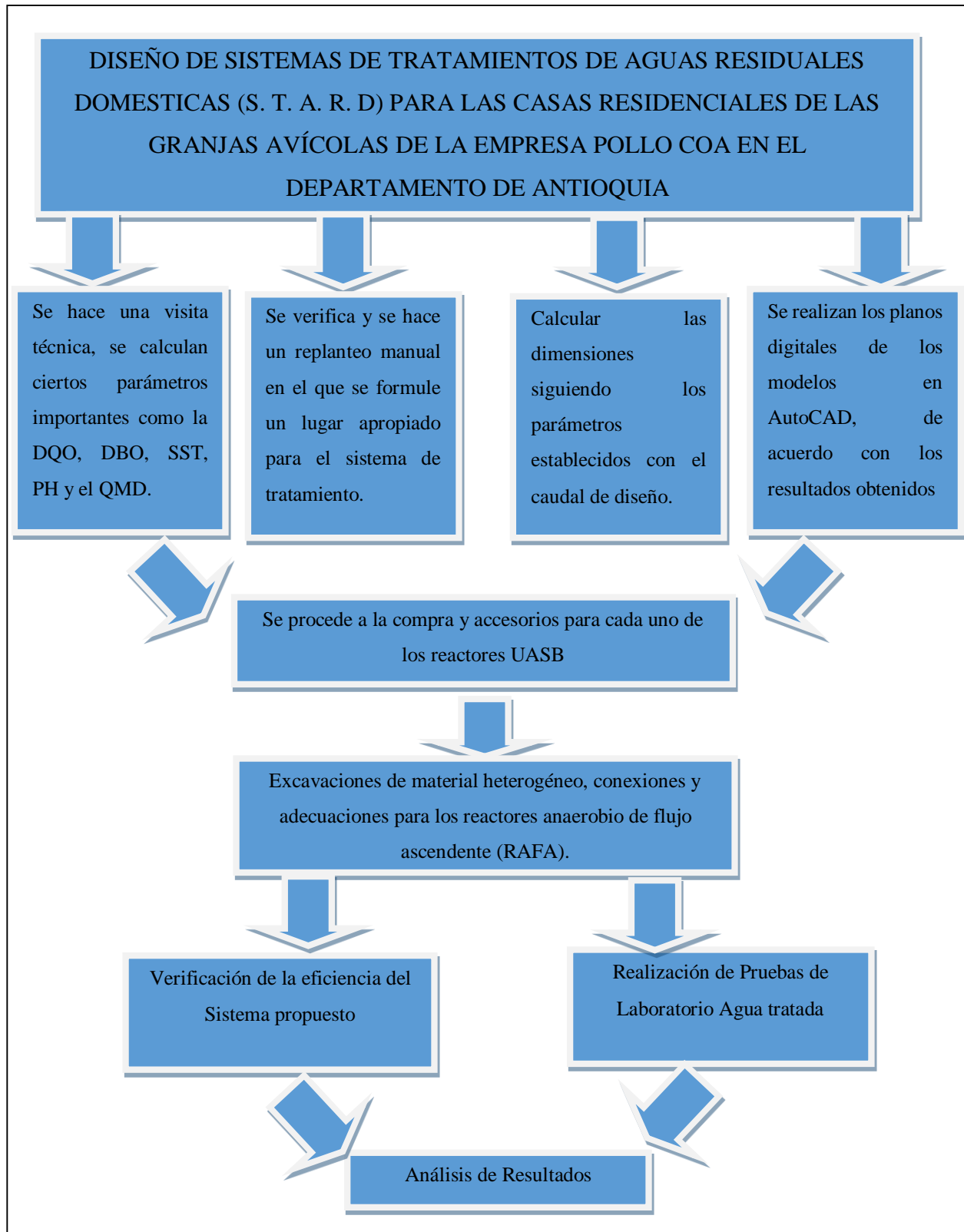
Etapas 4: Se realizan los planos digitales de los modelos en AutoCAD, de acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa 3.

Etapas 5: Se inicia con la compra de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA), con especificaciones de las dimensiones y los volúmenes de 3.300 L y 2.000 L, y materiales con accesorios para la construcción de trampa de grasa.

Etapas 6: Excavaciones de material heterogéneo, conexiones y adecuaciones para los reactores anaerobio de flujo ascendente (RAFA).

Etapas 7: Verificación del sistema propuesto en funcionamiento, se diseñará el manual de operación y mantenimiento para el reactor anaerobio de flujo ascendente.

Etapas 8: Análisis y verificación de los parámetros establecidos por la norma de la resolución del 0631 del 2015 de los valores máximos permisibles para la descarga en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas.

Figura 4. Proceso metodológico del proyecto.

4.1 Diagnóstico inicial de las granjas avícolas para los reactores UASB:

Se realizaron visitas técnicas a las granjas avícolas de pollo COA, donde se analizaron las aguas residuales domésticas, y donde se realizó una verificación y replanteo manual sobre la posición y la ubicación que puede tener los reactores anaerobios de flujo ascendente.

El procedimiento que se utilizó fue el establecido por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en su instructivo para la recolección de muestras de agua residual. Primero se estimó el valor de las alícuotas siguiendo la ecuación. (Instituto de Hidrología, 2007).

$$V_i = \frac{V * Q_i}{n * Q_p}$$

Donde:

V_i = volumen de cada alícuota o porción de muestra,

V = volumen total a componer (pueden ser 10 L),

Q_i = caudal instantáneo de cada muestra,

Q_p = caudal promedio durante el muestreo

n = número de muestras tomadas

Luego de cada una de las 8 muestras puntuales que se tomaron, se tomó el volumen de la alícuota, para finalmente mezclar en una sola, lo que se constituye como una muestra compuesta.

4.2 Análisis físico químico de los parámetros reportados del agua residual

Las muestras compuestas tomadas se conservaron en refrigeración a una temperatura de 4°C, y luego fueron transportadas al laboratorio de Acuazul Ltda. Ubicado en la sede del municipio de Medellín – Antioquia. Los parámetros medidos fueron: DQO, DBO5, SST, ST, grasas y aceites entre otros; luego de recibir el reporte de resultados, se realizaron los análisis con base al conocimiento teórico de operación y funcionamiento de las unidades de tratamiento.

4.3 Diseño de Reactores anaerobios de flujo ascendente

4.3.1 Metodología de diseño

La metodología que se muestra en la Tabla 5 se consultaron con el fin de diseñar bajo los mismos criterios, asumidos por los formuladores que desarrollaron varios diseños como se plantea para las plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR el cual se basa el libro “Tratamiento biológico de aguas residuales en regiones de clima cálido”, se parte asumiendo el TRH. Verificando que los demás parámetros se encuentren entre los valores recomendados por los estudios realizados y aceptados por diversos autores como (Azimi & Zamanzadeh, 2004).

Tabla 4. Criterios de diseño para un reactor anaerobio de flujo ascendente

Parámetro	Formula	Abreviatura
Cálculo del caudal de aguas residuales domesticas	$Q_D = \frac{C_R * P_S * D_{NETA}}{86400}$	QD: caudal de aguas residuales domésticas.
Cálculo del caudal medio diario de aguas residuales	$Q_{MD} = Q_D + Q_I + Q_C + Q_{IN}$	QMD: caudal medio diario de aguas residuales.
Cálculo del tiempo de retención hidráulico	$t = \frac{1}{VHL} = \frac{V}{Q}$	t: tiempo de retención hidráulico. V: volumen útil. Q: caudal medio.
Cálculo del volumen útil	$V = Q * t$	t: tiempo de retención hidráulico. V: volumen útil. Q: caudal medio.
Cálculo de la carga hidráulica volumétrica	$VHL = \frac{Q}{V}$	VHL: carga hidráulica volumétrica. V: volumen útil. Q: caudal medio.
Cálculo de la velocidad de flujo ascendente	$v = \frac{Q}{A}$	v = velocidad de flujo ascendente. Q = caudal medio. A = área de la sección transversal del reactor.
Cálculo de la eficiencia de remoción de DQO por el tiempo de retención	$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * t^{-0.35})$	eficiencia de remoción de DQO
Cálculo de la eficiencia de remoción de DBO por el tiempo de retención	$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.70 * t^{-0.50})$	la eficiencia de remoción de DBO
Cálculo de la eficiencia de remoción	$E = \frac{S_0 - S}{S_0} * 100$	eficiencia de remoción

4.3.2 Metodología propuesta para el diseño de un Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA).

Con base en la metodología de diseño encontrada, se realizó una integración de información para lograr un aditamento, con la intención de poner un orden en el procedimiento e incluir los sectores mostrados en la figura 3.

En la Tabla 6 y Tabla 7, se siguieron una secuencia de diseño partiendo de la carga hidráulica volumétrica y del tiempo de retención hidráulico, como criterios que se utilizan normalmente cuando se trata de aguas residuales domésticas, ya estas aguas residuales domesticas no tienen una carga orgánica tan alta como si ocurre con efluentes industriales. Los volúmenes de los RAFA se diseñaron por zonas, es decir, el volumen útil que contiene los lodos activos del agua residual, la zona de separación y la zona de sedimentación. Después de tener las dimensiones calculadas se evalúan los parámetros hidráulicos como: tiempo de retención hidráulico, carga hidráulica volumétrica y velocidad ascensional en el lecho filtrante.

Tabla 5. Diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente propuesto para la granja avícola Medellín.

zona de expansión de lodos		
	5.00	h
(t) Tiempo de retención hidráulica caudal medio	0.21	días
Volumen total= $Q \cdot t$	3.33	m ³
número de unidades	1.00	Unidades
volumen cada unidad/número de unidades	3.33	m ³
carga orgánica volumétrica	0.05	kg/m ³ *h
	16.00	m ³ /día
Caudal por unidad	0.67	m ³ /h
Factor k ₂	2.00	
	32.00	m ³ /día
Caudal pico por unidad	1.33	m ³ /h
Altura manto de lodos	2.50	m
Área del reactor	1.33	m ²
Ancho	1.15	m
Largo	1.15	m
velocidad ascendente en la zona de lodos para Q medio	0.50	m/hora

zona de separación de solidos		
Profundidad de la zona de separación (h)	1	m
velocidad aberturas Q_m	2	m/h
Área aberturas (Q/V)	0.33	m ²
velocidad aberturas Q_{pico}	4	m/h
Ancho de separadores	0.13	m
Zona de sedimentación		
Tiempo de retención hidráulico Q_m	2.00	hora
Volumen de sedimentación= $Q*T$	1.33	m ³
Área unidad	1.33	m ²
Área separación solidos	0.33	m ²
Área disponible sedimentación	1.00	m ²
Altura mínima de sedimentación	1.33	m
Eficiencia de remoción		
DBO	68.70	%
DQO	61.29	%
Resumen de dimensiones internas efectivas		
numero de reactores	1	unidad
Altura nivel de agua (Manto de lodos + sedimentación + deflector 15cm)	3.65	m
Ancho del reactor	1.15	m
Largo del reactor	1.15	m

Tabla 6. Diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente propuesto para la granja avícola Aljibes.

zona de expansión de lodos		
	5,00	h
(t) Tiempo de retención hidráulica caudal medio	0,21	días
Volumen total= $Q*t$	2,08	m ³
número de unidades	1,00	Unidades
volumen cada unidad/número de unidades	2,08	m ³
carga orgánica volumétrica	0,05	kg/m ³ *h
	10,00	m ³ /día
Caudal por unidad	0,42	m ³ /h
Factor k_2	2,00	
	20,00	m ³ /día
Caudal pico por unidad	0,83	m ³ /h
Altura manto de lodos	2,50	m
Área del reactor	0,83	m ²
Ancho	0,91	m

Largo	0,91	m
velocidad ascendente en la zona de lodos para Q medio	0.50	m/hora
zona de separación de solidos		
Profundidad de la zona de separación (h)	1,00	m
velocidad aberturas Qm	2,00	m/h
Área aberturas (Q/V)	0,21	m ²
velocidad aberturas Qpico	4,00	m/h
Ancho de separadores	0,13	m
Zona de sedimentación		
Tiempo de retención hidráulico Qm	2,00	hora
Volumen de sedimentación=Q*T	0,83	m ³
Área unidad	0,83	m ²
Área separación solidos	0,21	m ²
Área disponible sedimentación	0,63	m ²
Altura mínima de sedimentación	1,33	m
Eficiencia de remoción		
DBO	68.70	%
DQO	61.29	%
Resumen de dimensiones internas efectivas		
numero de reactores	1	unidad
Altura nivel de agua (Manto de lodos + sedimentación + deflector 15cm)	3,65	m
Ancho del reactor	1.15	m
Largo del reactor	0,91	m

Luego de obtener el cálculo de los volúmenes y el dimensionamiento de los reactores, se empezó a realizar la planimetría en AutoCAD. Posteriormente se empezó a cotizar con los proveedores, el costo de cada reactor según las especificaciones que se necesitaba para cumplir con los tiempos de retención hidráulica y la velocidad de flujo ascendente.

Después de la compra de los reactores anaerobios de flujo ascendente, se procedió en la excavación de material heterogéneo para la instalación del reactor UASB y adecuaciones de las tuberías que entran al reactor UASB, luego se empieza con la construcción de una caja de inspección para realizar posteriormente los análisis de laboratorio.

Posteriormente se inició con la puesta en marcha para los dos reactores anaerobios de flujo ascendente. Ya que estos reactores se conocen por literatura que tienen un arranque lento, por

consiguiente, se necesitaba inocular los reactores con lodos activados, ya sea de un tanque séptico o de un filtro anaerobio de flujo ascendente. La razón para inocular los reactores UASB con estos lodos, es que estos lodos contienen un consorcio de microorganismos capaces de biodegradar las aguas y producir biogás, estos lodos que se consiguieron fueron de un filtro anaerobio de flujo ascendente de otra granja avícola, los cuales tenían un periodo de tiempo de 90 días.

5. Análisis y Resultados

5.1 Diagnóstico inicial.

Luego de la puesta en marcha para los dos reactores UASB, se empezaron a realizar una campaña de seguimiento para saber cómo operaban los reactores y hacer análisis fisicoquímicos en los efluentes de cada reactor.

Se tomaron las muestras para los análisis de laboratorio en la caja de inspección que se construyó para la obtención de muestras, después, se utilizó una probeta para tomar ciertos volúmenes y se evidencio una precipitación del agua residual, luego de eso se vio un poco más clarificada en las salidas de los efluentes.

Luego de obtener los análisis fisicoquímicos de los efluentes de los reactores, se empezó a realizar una comparación con respecto a la resolución 0631 del 2015 la cual establece los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domesticas -ARD de acuerdo con el capítulo V artículo 8 “parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domesticas –ARD.(Ambiente et al., 2015).

Tabla 7. Comparación de los análisis de laboratorio con respecto a la resolución en la granja avícola Medellín

Granja Avícola Medellín			
Primer muestreo			
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Resolución 0631 del 2015
DQO	mg/L O ₂	120	200
DBO	mg/L O ₂	96	---
SST	mg/L O ₂	58	100
Segundo muestreo			
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Resolución 0631 del 2015
DQO	mg/L O ₂	150	200
DBO	mg/L O ₂	133	---
SST	mg/L O ₂	65	100

Tabla 8. comparación de los análisis de laboratorio con respecto a la resolución en la granja avícola Aljibes

Granja Avícola Aljibes			
Primer muestreo			
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Resolución 0631 del 2015
DQO	mg/L O ₂	112	200
DBO	mg/L O ₂	98	---
SST	mg/L O ₂	85	100
Segundo muestreo			
Parámetro	Unidades	Efluente UASB	Resolución 0631 del 2015
DQO	mg/L O ₂	155	200
DBO	mg/L O ₂	130	----
SST	mg/L O ₂	79	100

De las tablas 8 y 9 anteriores se puede apreciar como los vertimientos permisibles para el DBO₅ no se encuentran registrados con respecto a los 96 mg/l O₂ de la granja avícola Medellín y los 98 mg/l O₂ de la granja avícola Aljibes obtenidos en los ensayos. A su vez el valor permisible de Demanda Química de Oxígeno que según la resolución debe ser menor a los 200 mg/l O₂ que para este caso es del orden de los 120 mg/L O₂ de la granja avícola Medellín y los 112 mg/l O₂ de la granja avícola Aljibes. De lo anterior se puede apreciar que este tratamiento de agua si bien es cierto disminuye en gran medida los factores contaminantes del agua, está aún no puede ser consumida por humanos.

5.2 Análisis fisicoquímico de los parámetros reportados por el laboratorio de Acuzul

Los primeros datos que se obtuvieron fueron los de la caracterización de las primeras vinazas con que se reactivó la actividad de los microorganismos en los reactores UASB. Se reportan las propiedades fisicoquímicas como la DQO, la DBO₅, pH y Temperatura; dichos datos están reportados en las siguientes tablas:

Durante todo el proceso las condiciones de pH y Temperatura estuvieron muy constantes. Se trató de mantener un caudal medio promedio de aproximadamente 0.42 m³/h.

Para el proceso en batch se siguió la caracterización de las mismas propiedades fisicoquímicas, pero se tomaron datos tanto a la entrada (afluente) como a la salida (efluente) del reactor. Con estos datos se calculó el porcentaje de remoción o eficiencia del proceso para la DQO y la DBO₅, de acuerdo a las Ecuaciones antes citada. Los valores obtenidos se encuentran en la tabla 10, tabla 11, tabla 12, tabla 13:

Tabla 9. Análisis de DBO₅ en el reactor de la granja avícola Medellín.

°N	Meses	T(°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)		Remoción %
				Afluente	Efluente	
1	Noviembre	30	6	250	96	61.60
2	Diciembre	29	5.29	380	133	65.00
3	Enero	30	6.5	320	103.04	67.80
4	Febrero	31	7	275	88	68.00
5	Marzo	31	6.78	300	95.7	68.10

Tabla 10. Análisis de DQO en el reactor de la granja avícola Medellín.

°N	Meses	T(°C)	pH	DQO (mg/L)		Remoción %
				Afluente	Efluente	
1	Noviembre	30	6	260	120	53.85
2	Diciembre	29	5.29	350	150	57.14
3	Enero	30	6.5	320	126	60.63
4	Febrero	31	7	275	107	61.09
5	Marzo	31	6.78	300	117	61.00

Tabla 11. Análisis de DBO₅ en el reactor de la granja avícola aljibes.

°N	Meses	T(°C)	pH	DBO ₅ (mg/L)		Remoción %
				Afluente	Efluente	
1	Noviembre	30	6	254	109	57,1
2	Diciembre	29	5,29	380	130	65,8
3	Enero	30	6,5	320	103,04	67,8
4	Febrero	31	7	275	88	68,0
5	Marzo	31	6,78	300	95,7	68,1

Tabla 12. Análisis de DQO en el reactor de la granja avícola aljibes.

°N	Meses	T(°C)	pH	DQO (mg/L)		Remoción %
				Afluente	Efluente	
1	Noviembre	30	6	250	112	55,2
2	Diciembre	29	5,29	350	155	55,7142857
3	Enero	30	6,5	340	135	60,2941176
4	Febrero	31	7	275	107	61,0909091
5	Marzo	31	6,78	300	117	61

Se realizaron las gráficas de la DQO (Grafico No. 1 Y 2) y la DBO₅ (Grafico No. 3 Y 4), del afluente y del efluente a través del tiempo, en este caso meses, para encontrar la relación que hay entre estos dos puntos del reactor para las dos granjas avícolas. Así mismo se realizaron graficas del porcentaje de remoción tanto de la DQO (Grafico No. 5 Y 6) y la DBO₅ (Grafico No. 7 Y 8) para los dos reactores a través del tiempo.

Figura 5. Comparación de la DQO en el afluente y el efluente en el reactor UASB de 3,300 Lt a través del tiempo para la granja avícola Medellín

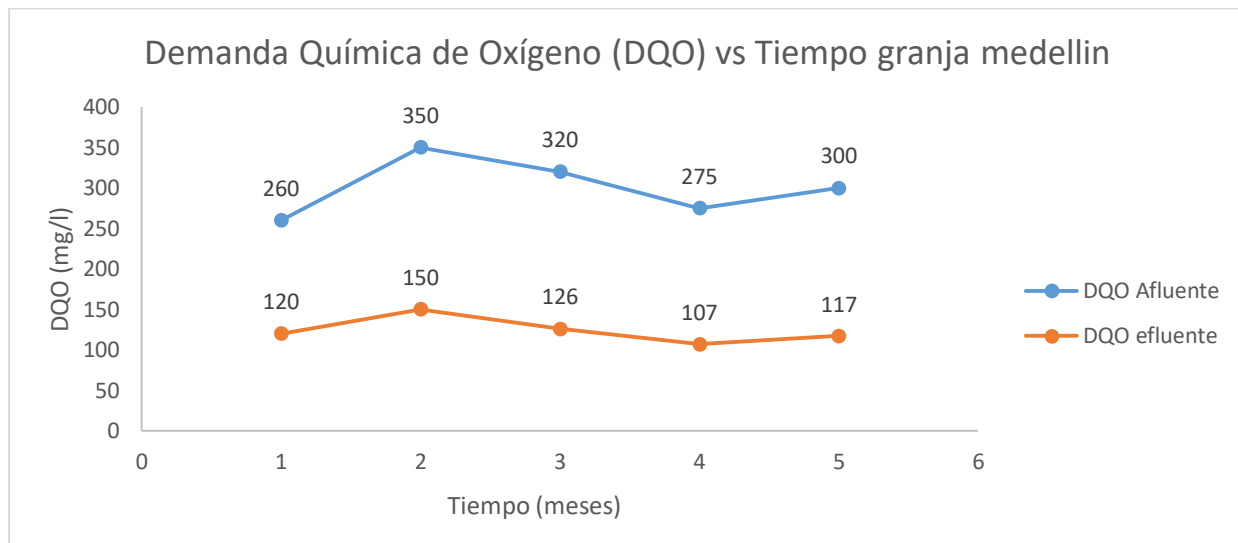
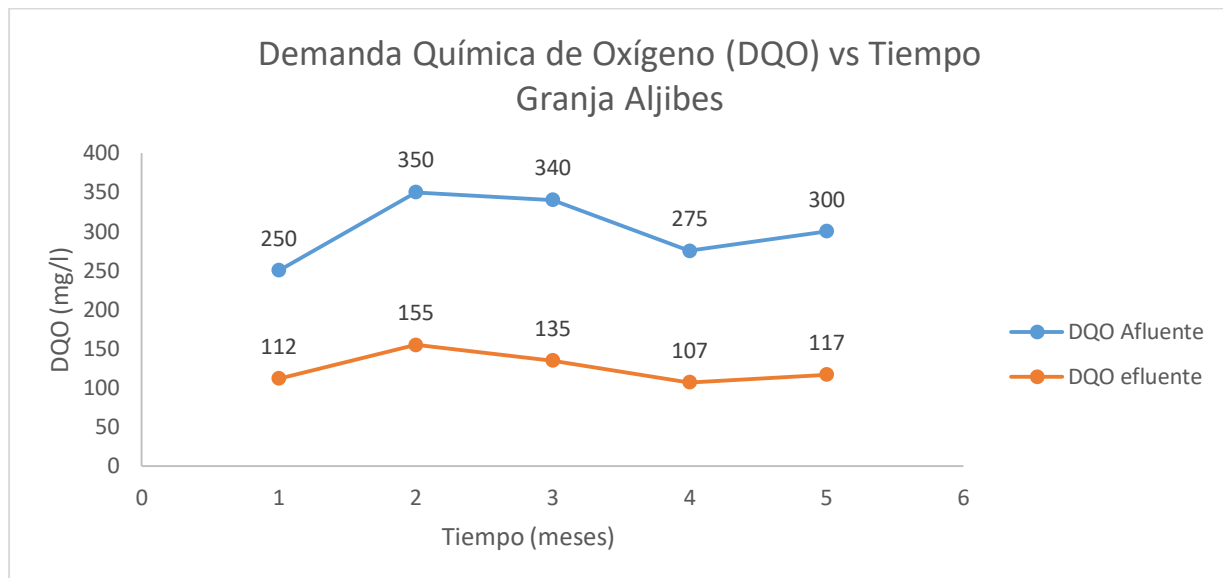


Figura 6. Comparación de la DQO en el afluente y el efluente en el reactor UASB a través del tiempo para la granja avícola Aljibes



En las figuras 5 y 6 anteriores se puede notar que la DQO de entrada y la DQO de salida tienen una relación muy estrecha, debido a que sus puntos crecientes y decrecientes siguen la misma relación, esto indica que hubo una remoción de la carga orgánica en sentido ascendente. Al igual que para la DQO se reportan los datos a la entrada y a la salida del reactor.

Se observa que la DQO en el afluente se trató de mantenerse constante y que a medida que pasaban los meses la diferencia entre la entrada y la salida se hacía más grande, lo que nos indica que hubo una mayor remoción de la carga orgánica; pudiéndose comprobar esto en los siguientes gráficos (figuras 7 y 8) en donde se presenta la relación de la eficiencia a través del tiempo.

Figura 7. Porcentaje de eficiencia en el reactor UASB de 3,300 Lt para la DQO a través del tiempo para la granja avícola Medellín.

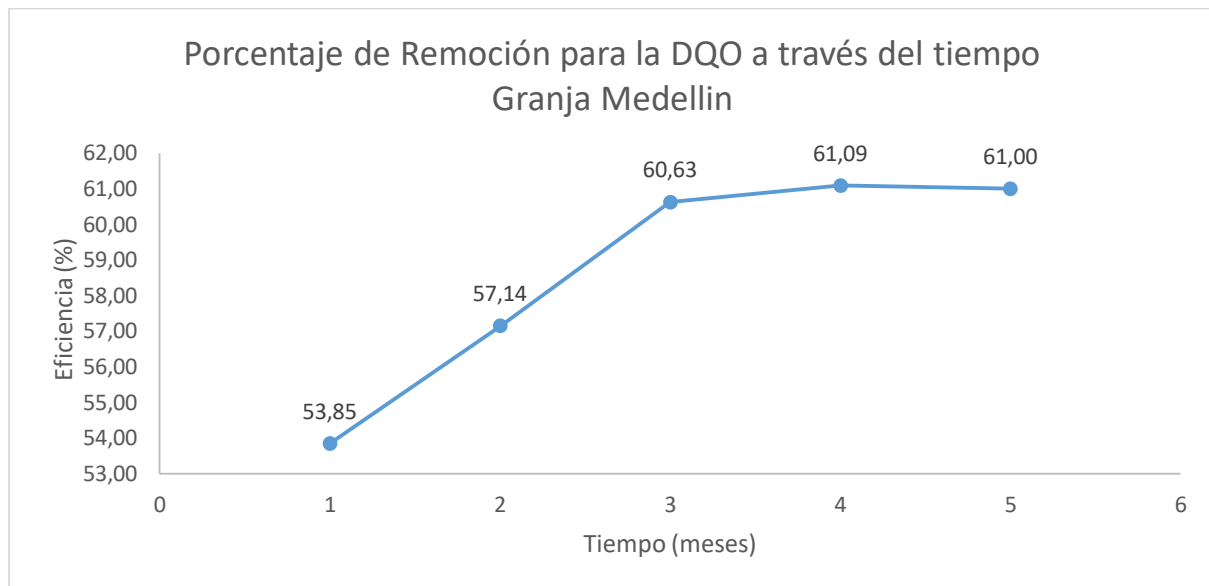
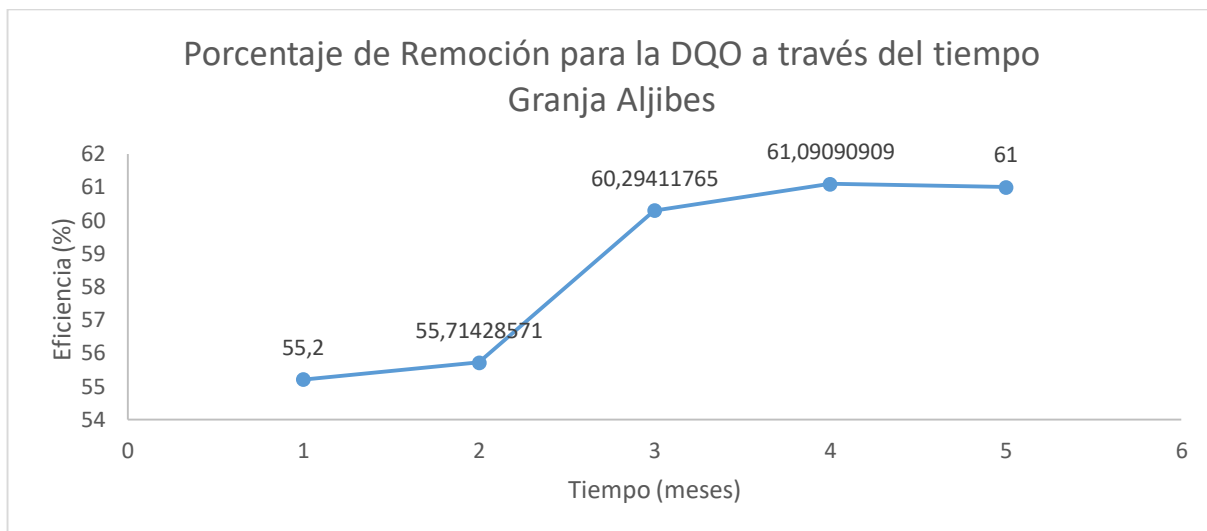


Figura 8. Porcentaje de eficiencia en el reactor UASB de 2000 Lt para la DQO a través del tiempo para la granja avícola Aljibes



En las gráficas ascendentes (Gráfico 3 y 4) los porcentajes de remoción de la DQO, se pueden observar una remoción constante a medida que finalizan los análisis en los dos últimos meses, lo cual nos indica que el reactor anaerobio de flujo ascendente se encuentra operando en estado estable y que a medida que pasa el tiempo los microorganismos van reduciendo cada vez más la carga orgánica.

Otros de los parámetros importantes que permite evaluar el reactor anaerobio de flujo ascendente es la demanda biológica de oxígeno (DBO_5). En las anteriores tablas (Tabla No. 10 y Tabla No. 12) se tabularon los datos experimentales encontrados en el seguimiento de esta variable. También se realizaron los gráficos de la variación de la DBO_5 a la entrada y a la salida (Gráfico 5 y 6).

Figura 9. Comparación de la DBO en el afluente y el efluente en el reactor UASB de 3,300 Lt a través del tiempo para la granja avícola Medellín.

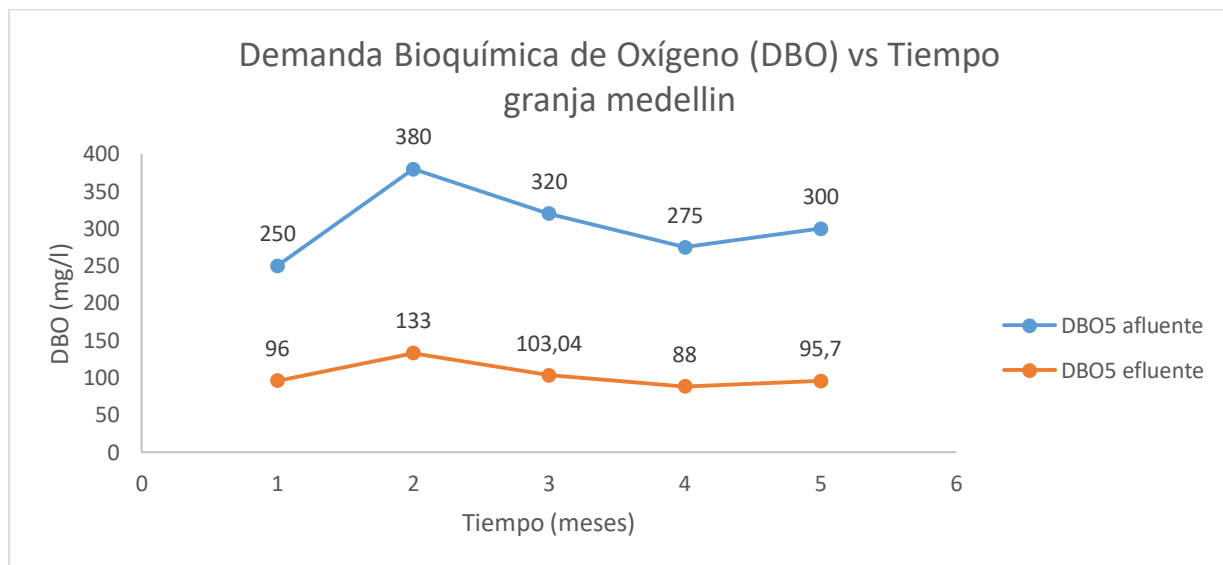
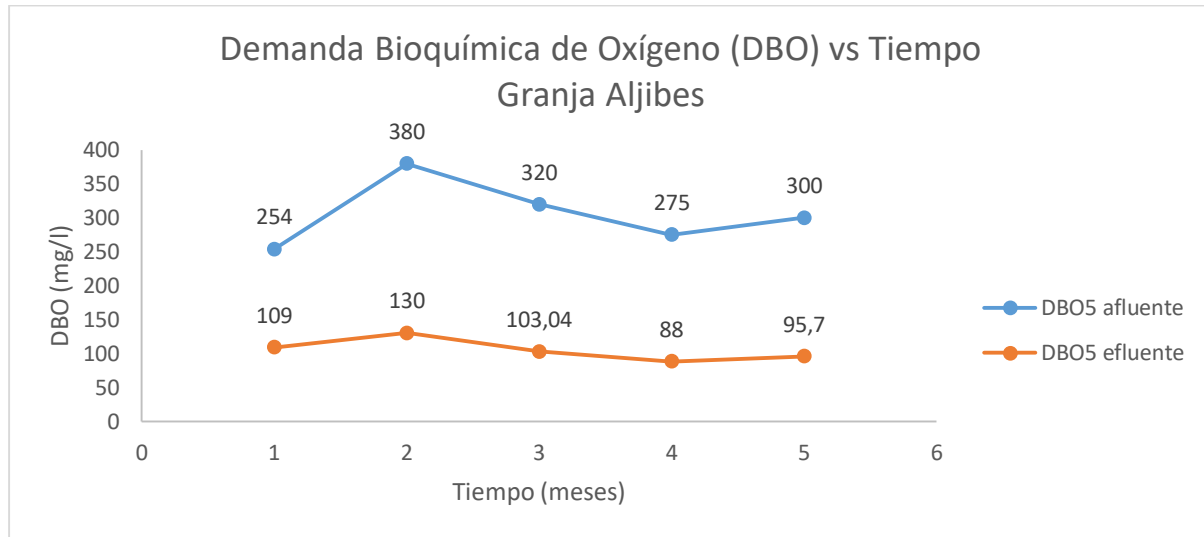


Figura 10. Comparación de la DBO en el afluente y el efluente en el reactor UASB a través del tiempo para la granja avícola Aljibes.



Para los anteriores gráficos (Gráfico 5 y 6) se puede ver que existe una similitud con el de la DQO, ya que se puede observar claramente que a medida que pasan los meses aumenta la diferencia entre la DBO₅ a la entrada y a la salida, y por lo tanto aumenta el porcentaje de remoción.

De los Gráficos 5 y 6 se puede distinguir que, para el primer, y el segundo mes, los valores de la DBO₅ no son similares, y que a medida que transcurre el tiempo aumenta la diferencia entre los datos del afluente y del efluente en cada una de dichos meses, indicando que el buen funcionamiento y de los microorganismos que descomponen la materia orgánica.

Figura 11. Porcentaje de Remoción en el reactor UASB de 3,300 Lt para la DBO5 a través del tiempo para la granja avícola Medellín.

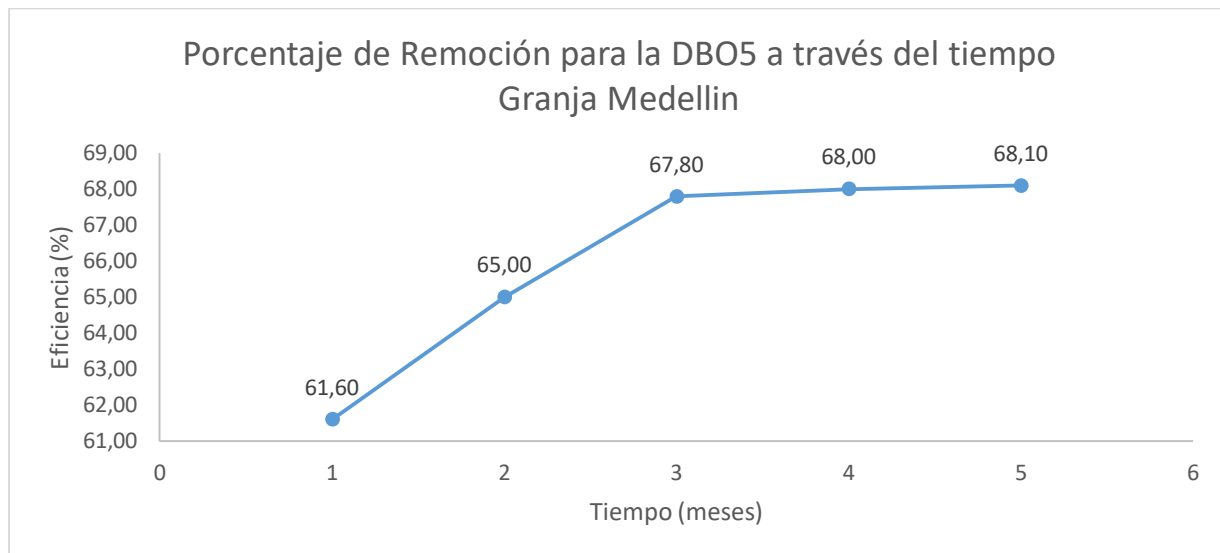
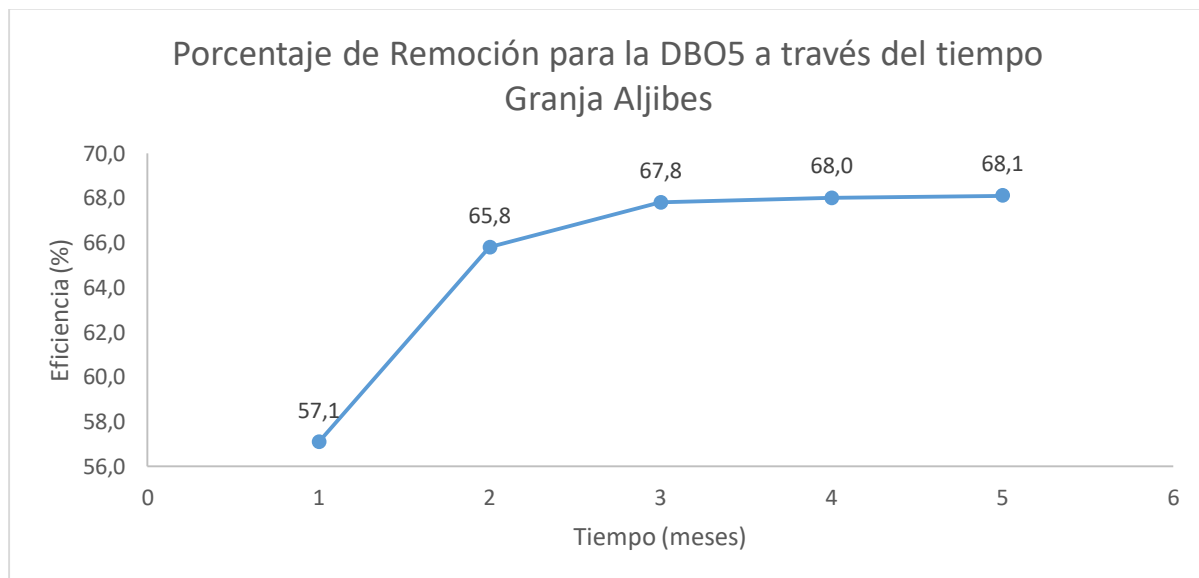


Figura 12. Porcentaje de Remoción en el reactor UASB de 2000 Lt para la DBO5 a través del tiempo para la granja avícola Aljibes



De los anteriores gráficos (Gráfico 7 y 8) nos ilustra que para un tiempo de retención hidráulico de 5 horas aproximadamente, al cabo de 5 meses se alcanzó para ambos reactores un porcentaje de remoción del 68% para la DBO₅.

6. Conclusiones

La indagación y el acceso a la información respecto a la guía en el diseño de los reactores anaerobios de flujo ascendente son insuficientes, aun sabiendo que este tipo de tecnología para el tratamiento de las aguas residuales, es un modelo usado frecuentemente en Colombia para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Los RAFA construidos en los trenes de tratamiento de las granjas avícolas, cumplen con el TRH de los municipios de Amaga y Medellín, a pesar de esto, también cumple con los demás parámetros hidráulicos de diseño (VHL, COV y velocidad ascensional), debido a esto, presentan un buen rendimiento, y por ende se traduce en sistemas operativos habilitados.

El diseño de los RAFA se afronta desde una perspectiva muy superficial, pues las metodologías encontradas consideran aspectos muy básicos; además de que consiguió obtener buenas eficiencias, cumpliendo con todos los parámetros hidráulicos de control para los reactores anaerobios de las dos granjas en este proyecto.

La eficiencia depende directamente del TRH, siendo este el parámetro fundamental en el diseño de los RAFA, en muchas ocasiones estos valores pueden sobrepasar lo que en teoría pueden alcanzar, además de esto el cumplimiento de los demás parámetros hidráulicos es omitido.

Los resultados obtenidos durante el periodo de recopilación de datos para las propiedades evaluadas, tuvieron una tendencia secuencial sin interrupciones y de las cuales se mostraron gráficos que corroboraba dicha secuencia a través del tiempo.

Solo se puede realizar la construcción de los reactores UASB con tres materiales: fibra de vidrio, plástico y concreto, en este proyecto se utilizó el material de fibra de vidrio y aunque es más caro que los otros materiales, su vida útil es mucho mayor que los dos otros materiales.

7. Recomendaciones

Mantener un buen control de las variables de diseño, como lo son el pH, la temperatura y los nutrientes principalmente, ya que de estos parámetros depende el buen funcionamiento del metabolismo de los microorganismos y por lo tanto se puede lograr una mayor remoción en cuanto a materia orgánica se refiere.

Para lograr una mayor eficiencia de remoción, se puede implementar un sistema combinado, donde la primera remoción se lleve a cabo en el reactor anaerobio de flujo ascendente y una segunda remoción en un filtro anaerobio de flujo ascendente.

Se logra obtener una gran producción de biogás a partir y realizar los análisis necesarios para obtener una gráfica de producción de biogás a través del tiempo. Por falta de tiempo y de recursos económicos no se logró ver en detalle y el seguimiento de otros reactores UASB en otras granjas avícolas.

Se desea realizar una investigación de la eficiencia de remoción, eficiencia de microorganismos y tiempo de durabilidad en condiciones ambientales para cada material en la que se pueda realizar la construcción de un reactor UASB.

Referencias

- Ambiente, M. D. E., Sostenible, Y. D., ministro, E. L., & Desarrollo, D. E. A. Y. (2015). *Resolución 631 de 2015*. 2015(49).
- Anda, J. de, Alberto, L., Villegas-garc, E., Riveros Olivares, B., & CONAGUA. (2016). Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento (Diseño de Plantas de Tratamiento Pretratamiento y Tratamiento Primario). *Publicaciones Estadísticas y Geográficas. SINA*, 130(November), 92.
- Azimi, A. A., & Zamanzadeh, M. (2004). Determination of design criteria for UASB reactors as a wastewater pretreatment system in tropical small communities. In *Int. J. Environ. Sci. Tech* (Vol. 1, Issue 1).
- Bhunia, P., & Ghangrekar, M. M. (2008). Analysis, evaluation, and optimization of kinetic parameters for performance appraisal and design of UASB reactors. *Bioresource Technology*, 99(7), 2132–2140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.053>
- Castillo, A., Llabres, P., & Mata-Alvarez, J. (n.d.). *A KINETIC STUDY OF A COMBINED ANAEROBIC± AEROBIC SYSTEM FOR TREATMENT OF DOMESTIC SEWAGE*.
- Caye M. Drapcho, N. P. N. T. H. W. (2020). *Biofuels Engineering Process Technology, Second Edition 2nd Edición, Edición Kindle*.
- Chernicharo, C. A. de L. (2007). *Biological Wastewater Treatment series*.
- Comisión Nacional de Aguas. (2019). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente*. www.conagua.gob.mx
- Córdova Mosquera, M. R. S. R. J. M. R. D. I. P. R. (2019). Evaluación de la arrancada de filtros anaerobios para el tratamiento de aguas residuales de café instantáneo. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*.
- Díaz-Báez, M. C. E. V. S. E. M. P. F. (2002). *Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología*.
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2007). *Toma de muestras de aguas residuales instructivo para la toma de muestras de aguas residuales*.
- Juan Sebastián et al. (2015). Evaluación, estudio y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el centro educativo Cecidic en el municipio de Toribío Cauca. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 5–24.

- López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. *Water Intelligence Online*, 16, 9781780409146. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- M von SPERLING. (2005). *Principios básicos do tratamento de esgotos. (2nd ed.)*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Metcalf, R. , & Eddy. (2007). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización (3rd ed.)*.
- Ministerio de Vivienda, C. y T. V. de A. y S. B. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico Sistemas de Acueducto*.
- Montoya Villafane, H. Humberto. (2008). *Microbiología básica para el área de la salud y afines*. Editorial Universidad de Antioquia.
- Orozco Jaramillo Alvaro. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales, teoría y diseño 2ed.*
- Padilla. (2010). *Evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro*.
- Potable, A., & Básico, S. (2016). *Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias*.
- Qasim, S. R. (2017). *Wastewater Treatment and Reuse Theory and Design Examples, Volume 2*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22366>
- Santiago, A. L., Salazar Pelaez, M. L., & Barceló Quintal, I. D. (2016). *Diseño y evaluación de un tanque séptico UASB para el tratamiento descentralizado de aguas residuales municipales* (p. 123).
- Sperling, M. von., & Chernicharo, C. A. de Lemos. (2005). *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. IWA.
- Water Environment Federation. (2017). *Design of Water Resource Recovery Facilities, Manual of Practice No.8, Sixth Edition (ASCE Manual and Reports on Engineering Practice Book 76) 6th Edición, Edición Kindle*.

Anexos

Fotografía 1. Revisión de compra de reactores anaerobios UASB



Fotografía 2. Reactores anaerobios UASB en fibra de vidrio.



Fotografía 3. Utilización de lodos activados de un filtro anaerobio de flujo ascendente.



Fotografía 4. Toma de muestras en caja de inspección.



Fotografía 5. Análisis de muestras de agua residual doméstica.



Fotografía 6. Precipitación de agua residual doméstica.

