

**DISEÑO DE UN TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO AL EFLUENTE DE UN
REACTOR UASB SUSTENTADO CON LIXIVIADOS GENERADOS EN EL
RELLENO SANITARIO LA CORTADA**

**PROYECTO PARA OPTAR POR EL
TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

YULIS VANESSA MOLINA MARTÍNEZ

1015457245

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA

2019

**DISEÑO DE UN TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO AL EFLUENTE DE UN
REACTOR UASB SUSTENTADO CON LIXIVIADOS GENERADOS EN EL
RELLENO SANITARIO LA CORTADA**

**PROYECTO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**YULIS VANESSA MOLINA MARTÍNEZ
1015457245**

**Ing. JULIO ISAAC MALDONADO
M.Sc. En Ingeniería Ambiental
Director**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA

2019

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado 1

Jurado 2

Dedicatoria

A ti DIOS, que eres el centro de todo, por ti y para ti todos mis triunfos.

*A mi Madre y hermana que son la columna de mi vida, la fuerza y el motivo de seguir
adelante.*

A mi padre que desde el cielo sé que me cuida y su recuerdo me motiva cada día

A mis abuelos y mi hermano que me inspiran a ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS que me ha dado la fuerza para enfrentar todos los obstáculos, con su amor y misericordia

Contenido

1. JUSTIFICACIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. MARCO REFERENCIAL	15
3.1 MARCO CONTEXTUAL	15
3.1.1 Descripción física del municipio de Pamplona- Norte de Santander	15
3.1.2 Área de Estudio:	16
3.2 MARCO TEÓRICO	17
3.3 MARCO LEGAL	39
3.4 ESTADO DEL ARTE.....	43
4. METODOLOGÍA	52
4.1 Lugar de Ejecución:	53
4.1.1 Universidad de Pamplona.....	53
4.2 Caracterización del Lixiviado	54
4.3 Adaptación del montaje del sistema de tratamiento de lixiviado a escala laboratorio	55
4.3.1 Sistema de Alimentación	55
4.3.2 Sistema controlador de temperatura	56
4.3.3 Montaje Tratamiento anaerobio	57
4.3.4 Tratamiento Físicoquímico	57
4.3.5 Diseño y adecuación del reactor UASB	58
4.4 Operación del reactor UASB a escala de laboratorio.....	58
4.4.1 Arranque del Reactor UASB	59
4.4.2 PREPARACIÓN DEL SUSTRATO	61
4.4.3 CAUDAL	62
4.4.4 CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA	63
4.4.5 Parámetros y cronograma de monitoreo	63
4.5 Diseñar el sistema de tratamiento de lixiviado.....	64

4.5.1	Determinación dosis optima de coagulante	65
4.5.2	Parámetros y cronograma de monitoreo	66
4.6	Evaluar el sistema de tratamiento de lixiviados	67
4.6.1	Tratamiento Biológico	67
4.6.2	Tratamiento Fisicoquímico	67
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
5.1	Caracterización del lixiviado.....	68
5.2	Montaje y operación del sistema de tratamiento a escala laboratorio	72
5.2.1	Tratamiento biológico anaerobio (UASB)	72
5.2.2	Revisión de diseño y adecuación del reactor UASB	75
5.2.3	Operación del reactor UASB a escala de laboratorio	78
5.3	Evaluación del sistema de tratamiento propuesto	81
5.3.1	Tratamiento biológico anaerobio reactor UASB	81
5.3.2	Tratamiento Fisicoquímico	87
5.3.3	Eficiencia tren de tratamiento anaerobio y fisicoquímico PAC	90
5.3.4	Eficiencia tren de tratamiento anaerobio y fisicoquímico Sulfato de Aluminio 91	
6	CONCLUSIONES	92
7	RECOMENDACIONES	93
8	BIBLIOGRAFÍA	95

Contenido de tablas

Tabla 1	Características típicos de los lixiviados.....	19
Tabla 2	Volumen alimentación	60
Tabla 3	Cronograma monitoreo	64
Tabla 4	Cronograma monitoreo tto fisicoquímico	66
Tabla 5	Fechas de muestras.....	69
Tabla 6	Cacterizacion del lixiviado del relleno LA CORTADA	69
Tabla 7	Clasificación Lixiviado según Renou	71
Tabla 8	Clasificación lixiviado según Amokrane, Comel, & Veron.....	71
Tabla 9	Parámetros de diseño UASB	75

Tabla 10 TRH según temperatura	75
Tabla 11 Coagulante PAC	87
Tabla 12 Eficiencia UASB y PAC	90

INTRODUCCIÓN

A medida que la sociedad ha crecido en número, ha cambiado sus costumbres y se ha tornado hacia la urbanización, de tal manera que han incrementado notablemente las necesidades de consumo de la humanidad. Debido a esto ha aumentado el uso irracional de diversos materiales, los cuales se convierten a corto plazo, en desechos que en unas cuantas décadas han generado una serie de dificultades a resolver. Desde el momento en que se acumula en casa la basura sin ser clasificada, se mezclan los diferentes residuos emanados de la misma (sobrantes de detergentes, materia orgánica en descomposición, productos de la oxidación de metales humedecidos, entre otros). Uno de los subproductos generados de dicha mezcla de residuos se convierte en un fluido que se denomina: lixiviado, el cual se

clasifica de acuerdo al tiempo de vida del mismo, y cuya composición es difícil de establecer como tal, pues esta dependerá de la combinación de las cantidades de uno u otro residuo contenidos en determinado lote de desechos. (Martinez-Lopez, 2014), los lixiviados son líquidos oscuros que se producen por la descomposición de la materia orgánica y el agua que entra al relleno por la precipitación, los cuales al fluir, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos. (Luna, 2008)

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos. Estas características son importantes en cuanto nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento, sin embargo, desde el punto de vista de la selección de la tecnología existen otras características que, sin ser necesariamente contaminantes, pueden afectar el funcionamiento de los procesos de tratamiento.

Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden categorizar de acuerdo a varias características como por ejemplo de acuerdo a los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover. Vale la pena recordar que los lixiviados contienen todos los mayores grupos de contaminación conocidos como son la contaminación por patógenos, por materia orgánica, la contaminación por nutrientes, y por sustancias tóxicas. Algunos procesos para el tratamiento pueden ser anaerobios, aerobios, sistemas naturales, evaporación, recirculación de lixiviados y sistemas de membranas. (Giraldo, 2001)

Es práctica común que los sistemas de tratamiento de lixiviados incorporen procesos fisicoquímicos y biológicos (aerobios y/o anaerobios), debido a sus elevadas cargas orgánicas. La aplicación del tratamiento biológico de aguas residuales pretende promover la coagulación y la eliminación de las partículas coloidales no sedimentables, la estabilización de la materia orgánica, y en algunos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. (Torres Lozada & Rodríguez, 2005)

Los tratamientos anaerobios se han convertido en un método popular para el tratamiento de aguas residuales, tanto por su efectividad en el tratamiento de agua residual con gran carga como por sus ventajas económicas. Desarrollado en los Países Bajos a finales de los setenta por el profesor Gatzke Lettinga, el reactor UASB (lecho de lodos anaerobio de flujo ascendente, por sus siglas en inglés) fue originalmente usado para tratar agua residual producto de la refinación de azúcar, cervecerías e industria del papel. En los últimos tiempos las aplicaciones de esta tecnología han alcanzado sectores como efluentes de plantas químicas y petroquímicas, industrias textiles y tratamiento de lixiviados. En estos años, el número de reactores anaeróbicos en el mundo se está incrementando rápidamente y cerca del 72% de estos son reactores basados en la tecnología UASB. (Leon & Fajardo, 2005).

El tratamiento fisicoquímico, consiste en la eliminación de las partículas suspendidas del líquido por la acción de sustancias denominadas coagulantes (sales metálicas y/o polielectrolitos). Involucra procesos de coagulación, floculación y sedimentación y el elemento fundamental para el éxito de este proceso es determinar el coagulante o la combinación de coagulantes más eficiente que se relaciona necesariamente con las características fisicoquímicas del líquido. (Novelo R. I., 2004)

En contexto, el objetivo de nuestro proyecto es caracterizar el lixiviado y evaluar la aplicación de Tecnología Anaerobia en un reactor UASB para la degradación biológica de los lixiviados, complementado de un tratamiento fisicoquímico a escala laboratorio; para los lixiviados provenientes del relleno sanitario La Cortada. Las unidades para llevar a cabo el tratamiento fisicoquímico son un mezclador rápido para la adición de un coagulante, un floculador y un sedimentador. Estas unidades se encuentran disponibles en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad De Pamplona. Se hará el montaje de todo el sistema incluyendo el UASB a escala de laboratorio en el laboratorio de Investigaciones del semillero GIIAS (Agua, Aire y Suelo), para su posterior monitoreo y evaluación del sistema.

1. JUSTIFICACIÓN

Una consecuencia inevitable de la existencia de los rellenos sanitarios, es la generación de lixiviados, que son una importante fuente de contaminación para aguas y suelos, sino son tratados adecuadamente; este líquido altamente contaminante se caracteriza por contener concentraciones elevadas de compuestos orgánicos e inorgánicos lo que dificulta su tratamiento. (Arango, 2018)

Según Yalcuk & Ugurlu en 2009, se han aplicado diversas tecnologías para la depuración de lixiviados, como tratamientos de tipo convencional, mediante procesos anaerobios, aerobios y sistemas de membrana, aunque, debido a la variabilidad en la calidad y la cantidad de este subproducto, estos sistemas pueden resultar poco eficientes, además de ser costosos, en su etapa constructiva y operativa (Jiménez Cerón & Calvache, 2018).

Los lixiviados generados en el relleno sanitario La cortada en el municipio de Pamplona; hasta el día de hoy se les da un manejo de recirculación como alternativa para su tratamiento. Este tipo de tratamiento aumenta la humedad de los residuos dispuestos y la tasa de generación de gas; por lo cual se genera aumentos significativos de las presiones internas de los fluidos, gases y líquidos, que comprometen la estabilidad estructural de los taludes (Giraldo, 2001), debido a factores como la infiltración, además de generar problemas ambientales por malos olores, vectores y roedores.

Mendoza & López, señalan que la tratabilidad de un lixiviado está directamente relacionado con su composición química y esta a su vez depende de factores como el tipo de desecho, edad, condiciones ambientales y aspectos técnicos característicos del relleno sanitario, los cuales obligan a conocer sus características y evaluar el tratamiento más indicado para estos. (Arango, 2018)

Exponiendo la problemática que presenta el relleno sanitario La Cortada y posiblemente otros lugares de disposición final de residuos, una posible solución para el manejo de los lixiviados es la aplicabilidad de métodos fisicoquímicos y biológicos para evitar la contaminación de suelos, acuíferos y aguas superficiales; esto mediante la construcción de reactores UASB para una degradación biológica del mismo, acompañado de otros tratamientos para una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes que constituyen a los lixiviados. Por tanto este proyecto se enfoca en determinar las características fisicoquímicas del lixiviado y evaluar dos métodos de tratamiento (Biológico y Fisicoquímico) a escala de laboratorio, a fin de mitigar el impacto provocado por el líquido contaminante.

Se espera que los resultados de esta investigación sean satisfactorios, con altas eficiencia de remoción, y que se tengan en cuenta para determinar los tratamientos adecuados de los lixiviados del relleno sanitario la Cortada basados en sus características fisicoquímicas y así generar un impacto sanitario positivo para mejorar la calidad de vida de la población que se abastece de los cuerpos de aguas cercanos , y así mismo la conservación de la cuenca cercana; además de mitigar los problemas ambientales generados por los olores y roedores.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar un tratamiento fisicoquímico al efluente de un reactor UASB sustentado con lixiviados generados en el relleno sanitario La Cortada.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los lixiviados generados en el relleno sanitario La Cortada

- Realizar el montaje del sistema de tratamiento biológico y operar el reactor UASB a escala laboratorio
- Diseñar el sistema de tratamiento fisicoquímico y realizar estudios de tratabilidad al efluente
- Evaluar el sistema de tratamiento biológico y fisicoquímico

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 MARCO CONTEXTUAL

3.1.1 Descripción física del municipio de Pamplona- Norte de Santander

Pamplona es un municipio colombiano, ubicado en el departamento de Norte de Santander. Está localizado geográficamente en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, en las coordenadas 72 ° 39' de longitud al oeste de Greenwich y a 7 ° 23' de latitud norte, a una altitud de 2200 metros sobre el nivel del mar, en la zona suroccidental el departamento de Norte de Santander. Su extensión territorial es de 1.176 km² y su temperatura promedio de 16 °C. Limita al norte con Pamplonita, al sur con Cúcota y Chitagá, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla. (Alcaldía de Pamplona)

Ilustración 1 Ubicación de pamplona-Norte de Santander



Fuente: Alcaldía de Pamplona

3.1.2 Área de Estudio:

Relleno Sanitario La Cortada, Pamplona

El relleno sanitario regional “La Cortada” está emplazado junto a la ruta nacional 55 en la Vereda Chíchira al costado Nororiental de la vía pamplona Chitaga a la altura del kilómetro 3.5, a tres (3) kilómetros del perímetro urbano del municipio de Pamplona Departamento Norte de Santander. Presenta una temperatura promedio de 14,9°C. El relleno nos suministró el sustrato (lixiviado) requerido para el posterior desarrollo del proyecto y sus respectivos análisis.

Ilustración 2 Ubicación relleno sanitario



Fuente: Rozo (2018)

3.2 MARCO TEÓRICO

Unos de los retos que deben enfrentar los agentes y representantes del Estado en el mundo, es la problemática del manejo de los residuos generados por los habitantes de este; que de acuerdo con lo establecido en la política nacional para la Gestión de residuos y basuras, “Residuos son todos aquellos que mediante cualquier forma de aprovechamiento se reincorporaran al ciclo económico, mientras que basura es lo que no se aprovecha, no reingresa al ciclo económico y va a disposición final”.

De lo anterior surge la necesidad de crear e implementar estrategias y métodos que permitan a las personas hacer un manejo adecuado de los residuos sólidos. (Rodríguez). Un elemento funcional de un sistema integrado de manejo de residuos sólidos domiciliarios municipales es la disposición final de estos. Según (Rodríguez) El sistema de disposición final más utilizado en el mundo entero es el denominado Relleno Sanitario; como lo cita (Luna, 2008) es un lugar técnicamente diseñado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería. Confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

Todo relleno sanitario o sitio de disposición final genera lixiviados que son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos que se encuentran en el proceso de estabilización; es decir, fluidos que brotan a la superficie o se infiltran hacia el terreno

donde se encuentra instalado un relleno sanitario o un vertedero de basura y que arrastran a su paso compuestos que son producto de las reacciones que ocurren con la finalidad de alcanzar el equilibrio tras su degradación. Una de sus principales fuentes es el agua de lluvia o el agua de composición y de la humedad de los desechos que drenan y percolan a través de las grietas y capas de basura, proporcionando a su paso reacciones y procesos fisicoquímicos y biológicos. (Chávez, 2013)

Composición de los lixiviados

Los lixiviados en el relleno arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tengan elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café-pardo-grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen. Se reportan concentraciones tan elevadas como 60,000 mg/l de DQO. Los lixiviados también poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y de metales pesados. Varios estudios indican que el carbono orgánico en forma coloidal tiene el potencial de adsorber altas concentraciones de metales en su superficie, por lo que actúan como transporte de metales traza en los lixiviados (Luna, 2008)

La composición de los lixiviados depende del tipo de desecho confinado, del nivel de degradación de los residuos y del volumen producido. En el proceso, no pueden verse separados los líquidos provenientes de procesos de reacción bioquímica y de lixiviación. Todo cambio en la estructura y composición del relleno tiene efecto sobre las corrientes y la acumulación, de tal modo que el agua y los procesos en el relleno son magnitudes que se influyen recíprocamente. (Novelo, Borges, & Riancho, Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario, 2004)

Tabla 1 Características típicas de los lixiviados

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS TÍPICAS DE UN LIXIVIADO			
EDAD DEL RELLENO	NUEVO (< 2 AÑOS)	NUEVO (< 2 AÑOS)	> 10 AÑOS
CONSTITUYENTES	RANGO	VALOR TÍPICO	RANGO TÍPICO
DQO	3000 - 80000	18000	100 - 500
DBO ₅	2000 - 30000	10000	100 - 200
COT	1500 - 20000	6000	80 - 160
SST	200 - 2500	500	100 - 400
Nitrógeno Total	20 - 1500	400	100 - 200
Fósforo Total	5 - 100	30	5 - 10
Alcalinidad CaCO ₃	1000 - 10000	3000	200 - 1000
Sales Solubles	200 - 4000	800	100 - 500
Hierro	50 - 1200	60	20 - 200
Plomo	1 - 10	2	0.01 - 0.5
Zinc	25 - 250	50	0.1 - 1
pH	5 - 8	6	6.6 - 7.5

Fuente: Peña, 2017

Determinar el tratamiento más adecuado para un lixiviado de relleno sanitario es complicado, ya que se trata de residuos líquidos con alto contenido de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas. Se han realizado vastas investigaciones en busca de tratamientos adecuados para los lixiviados; sin embargo, debido a la heterogeneidad en su

composición y a la variabilidad de los volúmenes generados, no se pueden extrapolar directamente los resultados obtenidos con tratamientos de un lixiviado a otro. Por lo tanto, cada lixiviado proveniente de un relleno sanitario debe ser evaluado individualmente y sometido a pruebas de tratabilidad para encontrar el sistema de tratamiento adecuado para su manejo. (NOVELO, y otros, 2009)

La remoción de materia orgánica constituye uno de los objetivos del tratamiento de las aguas residuales, utilizándose en la mayoría de los casos procesos biológicos. El mecanismo más importante para la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual, es el metabolismo bacteriano. El metabolismo consiste en la utilización por parte de las bacterias, de la materia orgánica como fuente de energía y carbono para generar nueva biomasa. Cuando la materia orgánica es metabolizada, parte de ella es transformada químicamente a productos finales, en un proceso que es acompañado por la liberación de energía llamado “Catabolismo”. Otro proceso denominado “Anabolismo ó Síntesis” ocurre simultáneamente, donde parte de la materia orgánica se transforma en nuevo material celular (RODRÍGUEZ)

El tratamiento de aguas residuales domésticas se realiza aplicando una combinación procesos fisicoquímicos y biológicos, principalmente para remover sólidos sedimentables, disueltos y en suspensión, materia orgánica, metales, nutrientes y microorganismos patógenos). Los métodos físicos-químicos son menos aconsejables desde el punto de vista económico que los métodos biológicos, por el aporte continuo de reactivos y el tiempo de operación que requieren. Los procesos aerobios necesitan oxigenación continua, encareciendo el proceso y generando un alto volumen de lodos no estabilizados que deben ser tratados posteriormente (Ramdani, et al., 2010; Torres, 2012). En las últimas décadas,

existe un creciente interés en desarrollar procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales con diferentes niveles de carga orgánica, en comparación con la implementación de los procesos aerobios establecidos (Moscoso, 2011).

TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

El tratamiento biológico consiste en una serie de mecanismos aerobios (en presencia de oxígeno) o anaerobios (sin presencia de oxígeno), en los que intervienen los microorganismos como las bacterias principalmente con el objetivo de eliminar componentes contaminantes en los ecosistemas

Este tipo de tratamiento se ha venido aplicando tradicionalmente en aguas residuales para la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal y compuestos que contienen nitrógeno y fósforo, aprovechando la capacidad de los microorganismos de asimilar estos elementos para su propio crecimiento y reproducción. Cuando se reproducen, se adhieren entre ellos y forman unos flóculos macroscópicos con suficiente masa crítica como para sedimentar en poco tiempo.

La aplicación del tratamiento biológico de aguas residuales pretende promover la coagulación y la eliminación de las partículas coloidales no sedimentables, la estabilización de la materia orgánica, y en algunos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. En el caso de los procesos aerobios, el principal subproducto es biomasa (lodo); en los anaerobios es el biogás (metano), y en una proporción mucho menor el lodo. Ambos procesos han sido utilizados en el tratamiento de lixiviados; sin embargo, la implementación de una etapa anaerobia sola o combinada con un proceso de tratamiento

biológico complementario presenta ventajas técnicas y económicas comparado con el proceso aerobio como única etapa de tratamiento debido a aspectos como menor requerimiento de área e infraestructura en la planta de tratamiento (PTAR), bajos consumos de energía, menor producción de lodos, eliminación de la unidad de digestión y espesamiento del lodo en exceso, pues estas etapas ocurren en la misma unidad anaerobia que trata el agua residual y producción de metano, subproducto más importante del proceso anaerobio que puede ser recuperado y utilizado como una alternativa energética. (Lozada, Rodríguez, Barba, Morán, & Narváez, 2006)

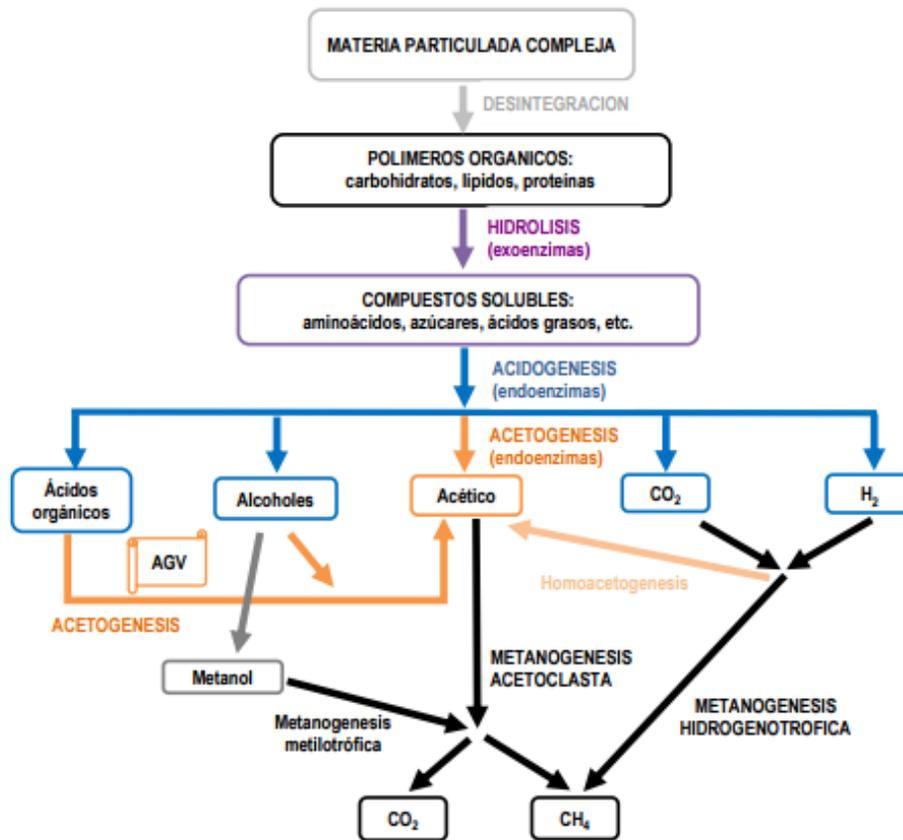
Tratamiento aerobio

Este tipo de tratamiento consiste en la depuración de los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado por microorganismos en presencia de oxígeno y agitación, para evitar condiciones de anaerobiosis dentro de los tanques de depuración. Durante esta degradación se forman sólidos decantables que se separan con facilidad de la fracción líquida. Estos sistemas requieren de ciertas condiciones estables de funcionamiento, carga orgánica, concentración de nutrientes, de pH, etc. Se puede llegar a aplicar un tratamiento aerobio mediante el uso de lagunas aireadas, sistemas de lodos activados, sistemas biológicos de discos rotatorios (biodiscos), filtros percoladores, etc. Usualmente los lixiviados tienen valores altos de DBO, por lo que aplicando este tipo de tratamiento se podrán tener porcentajes de remoción arriba del 90%. Sin embargo, la DBO remanente puede ser mayores a 1000 mg/l (Martínez-López, 2014)

Tratamiento anaerobio

La digestión anaerobia es un proceso microbiológico complejo que se realiza en ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica se transforma a biomasa y compuestos orgánicos, la mayoría de ellos volátiles. Aunque es un proceso natural, sólo en los últimos veinticinco años ha llegado a ser una tecnología competitiva en comparación con otras alternativas. Esto ha sido posible gracias a la implementación de sistemas que separan el tiempo de retención hidráulico (TRH), del tiempo de retención celular (TRC) los cuales han sido denominados reactores de alta tasa. Durante este proceso también se obtiene un gas combustible (Biogás) y lodos con propiedades adecuadas para ser usados como bioabonos. (Bermúdez,et. al.,2011)

Ilustración 3 Descomposición Anaerobia



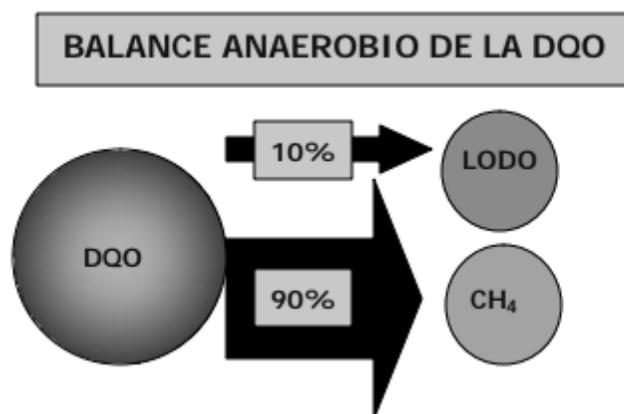
Fuente: Paña,2017

La tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales, se encuentra bien consolidada. Entre las principales ventajas se destacan: menor costo de instalaciones, no es necesario suministrar oxígeno por lo que el proceso es más económico y menor requerimiento energético, además de producir bajas cantidades de lodos si se compara con

las tecnologías aerobias. También se puede implementar en sistemas compactos que requieren menor área de terreno, que los sistemas de lagunajes. No obstante, estos sistemas presentan desventajas como: requieren de un mayor tiempo de contacto o retención hidráulica, así como más tiempo de aclimatación lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y dificultades para tratar aguas residuales con bajas cargas orgánicas. Por lo general, se requiere de un pos-tratamiento ya sea para descargar en los cuerpos receptores o para su reusó (Mara, 2004; Calijuri et al., 2009; Rojas et al., 2010).

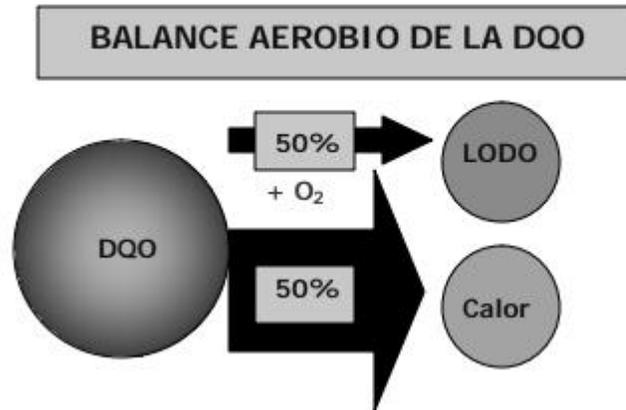
En el campo del tratamiento de las aguas residuales, la contaminación orgánica es evaluada a través de la DQO (demanda química de oxígeno), la cual mide básicamente la concentración de materia orgánica. La forma de apreciar lo que ocurre con la materia orgánica en el tratamiento anaerobio de aguas residuales, es comparando su balance de DQO con el del tratamiento aerobio

Ilustración 4 Balance Anaerobio de la DQO



Fuena: Torres,2014

Ilustración 5 Balance aerobio de la DQO



Fuente: Torres,2014

DIGESTIÓN ANAEROBIA

La Digestión Anaerobia es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. El proceso se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y de CO₂, en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas.

Ilustración 6 Degradación materia orgánica



Fuente: Torres,2014

Teniendo en cuenta lo descrito por (Lorenzo & Obaya, 2006) en su artículo LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y LOS REACTORES UASB. GENERALIDADES (2006) Existen numerosos reactores biológicos para el tratamiento de aguas servidas. Estos reactores pueden ser clasificados según: El proceso bioquímico: Proceso Aeróbico (e.g., lodos activados, lagunas de maduración, filtros biológicos, lagunas de alta velocidad). Proceso Anaeróbico (e.g., lagunas anaeróbicas, reactores anaeróbicos tipo UASB). Proceso Facultativo (ejemplos: lagunas facultativas, algunos tipos de humedales artificiales- "wetlands", reservorios de aguas servidas). Según las características de la biomasa Reactores con biomasa suspendida (ejemplos, lodos activados, reactores anaeróbicos tipo UASB, lagunas de estabilización, lagunas aeradas) Reactores con biomasa fija (o biofilms) (ejemplos, filtros biológicos, humedales artificiales, lagunas de macrófitas, filtros de rocas) y Reactores con biomasa combinada.

Como lo cita (Lorenzo & Obaya, 2006) Ninguna de estas tecnologías es definitivamente mejor que las otras. Cada una tiene sus ventajas y desventajas en relación a costos de construcción, costos de operación, uso de energía, tamaño, facilidad de operación, estabilidad, confiabilidad, etc. Cada una se adapta mejor a ciertas condiciones específicas. Siguiendo en contexto con nuestro proyecto describiremos las generalidades del UASB ya que es la tecnología utilizada para el desarrollo del proyecto planteado.

Tratamiento Fisicoquímico

El tratamiento fisicoquímico, consiste en la eliminación de las partículas suspendidas del líquido por la acción de sustancias denominadas coagulantes (sales metálicas y/o polielectrolitos). Involucra procesos de coagulación, floculación y sedimentación y el elemento fundamental para el éxito de este proceso es determinar el coagulante o la combinación de coagulantes más eficiente que se relacionan necesariamente con las características fisicoquímicas del líquido. Características como la alcalinidad, el pH, la concentración de sólidos suspendidos, carga eléctrica de las partículas suspendidas y la forma de agregación de estos sólidos son más relevantes que la concentración orgánica total, sobre todo de la fracción soluble. (Novelo R. M., Ingeniería Revista Académica, 2004).

Según Tamayo (2006), en los tratamientos fisicoquímicos se lleva a cabo el proceso de remoción de contaminantes a partir de la adición de sustancias químicas, en conjunto con la disposición de unidades en las que tienen lugar operaciones de separación de elementos no deseados por medio de principios físicos. Algunos de los principales tratamientos fisicoquímicos empleados son: Coagulación, precipitación, floculación y sedimentación Adsorción con carbón activado. Intercambio iónico, Oxidación química. Evaporación natural, Inyección de aire. Filtración. Osmosis inversa y ultrafiltración, Algunos de estos sistemas presentan un alto grado de sofisticación y representan una solución costosa para el tratamiento de lixiviados. (PEÑA, 2017).

Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos. El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada. (Cárdenas, 2000)

Coagulantes Utilizados

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. (Cárdenas, 2000)

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son:

- a) Sulfato de Aluminio.
- b) Aluminato de Sodio.

- c) Cloruro de Aluminio.
- d) Cloruro Férrico.
- e) Sulfato Férrico.
- f) Sulfato Ferroso.
- g) Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación).

Siendo los más utilizados las sales de Aluminio y de Hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. (Cárdenas, 2000)

Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. Suceden que los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no sean lo que suficientemente grande como para sedimentar con rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados, tal como se está mostrando en la Figura 19. La floculación es favorecida por el mezclado lento

que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso. La floculación puede ser mejorado por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación (Cárdenas, 2000)

Sedimentación

Se trata de una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad. Es una operación controlada por la transferencia de cantidad de movimiento. En algunos casos, como cuando existen fuerzas de interacción entre las partículas y éstas son suficientemente pequeñas (suspensiones de tipo coloidal), la sedimentación natural no es posible, debiendo antes proceder a la floculación o coagulación de las partículas.

Para que la sedimentación sea viable en la práctica, el tamaño de las partículas y su concentración en la suspensión deben tener unos valores mínimos, del orden de 1-10 micras y 0,2% de sólido en la suspensión. La sedimentación se utiliza para separar las partículas sólidas dispersas en un líquido. La diferencia de densidades entre las partículas sólidas y el líquido hace que, aunque éste último tenga un movimiento ascendente y las partículas sólidas sedimenten, depositándose en el fondo de donde son eliminadas en forma de lodos. La viscosidad del líquido frena las partículas sólidas, que deben vencer el rozamiento con el líquido en el movimiento de caída. En este proceso las partículas sólidas ceden parte de su cantidad de movimiento a las moléculas del líquido de su alrededor. Cuanto mayor sea la viscosidad del líquido, tanto más se frena el movimiento de las partículas. Las moléculas

del líquido, aceleradas por contacto con el sólido transmiten su movimiento a capas de líquido más alejadas debido a las interacciones intermoleculares, de las que la viscosidad es una medida. La operación de sedimentación está, pues, controlada por el transporte de cantidad de movimiento. (Sedimentacion)

Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodo (UASB)

Las siglas que dan nombre a este reactor provienen de Upflow Anaerobic Sludge Blanket, este fue desarrollado por Gatzke Lettinga y colaboradores en Holanda en la década de los 70. (CARO, 2017). El proceso anaeróbico de flujo ascendente consiste básicamente de un tanque Imhoff, "al revés", presentando las cámaras de decantación y digestión anaeróbica superpuestas. En este digestor existen 3 zonas bien definidas (Montalvo, 2000) como se cita en (Lorenzo & Obaya, 2006):

Las zonas son:

- Zona de lecho de lodos, en la cual se concentran los microorganismos que van a biodegradar el material orgánico presente en el agua residual a tratar.
- Zona donde se encuentran dispersos los microorganismos a lo largo del UASB.
- Zona de separación gas - líquido - sólido.

En este proceso, el residuo que se quiere tratar se introduce por la parte inferior del reactor. El agua residual fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y el lodo microbiológico. Los gases producidos en condiciones

anaeróbicas (principalmente metano y dióxido de carbono) provocan una circulación interior, que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. Parte del gas generado dentro del manto de lodos se adhiere a las partículas biológicas. Tanto el gas libre como las partículas a las que se ha adherido gas, ascienden hacia la parte superior del reactor. Allí se produce la liberación del gas adherido a las partículas, al entrar éstas en contacto con unos deflectores desgasificadores.

Las partículas desgasificadas suelen volver a caer hasta la superficie del manto de lodo. El gas libre y el gas liberado de las partículas se capturan en una bóveda de recogida de gases, instalada en la parte superior del reactor. El líquido, que contiene algunos sólidos residuales y algunos de los gránulos biológicos, se conduce a una cámara de sedimentación, donde se separan los sólidos residuales. Los sólidos separados se conducen a la superficie del manto de lodo a través del sistema de deflectores. Para mantener el manto de lodo en suspensión, es necesario que la velocidad de flujo ascendente tenga un valor entre 0,6 y 0,9 m/h. (8) La idea básica de este proceso es que el lodo anaerobio tenga buenas características de sedimentación, si les son favorables las condiciones físicas y químicas del proceso de floculación. Si se logran estas condiciones, la retención del lodo, o sea, los microorganismos, dependerán principalmente de una separación efectiva del gas producido en el proceso (especialmente de las burbujas de gas atrapadas en el lodo).

Después de la separación del gas la sedimentación del lodo procede favorablemente. En el UASB estos objetivos se cumplen equipando el reactor en la parte superior con un separador sólido - gas y manteniendo un mezclado mecánico y/o la recirculación del lodo a niveles mínimos.

Los reactores del tipo UASB presentan una serie de ventajas sobre los sistemas aerobios convencionales, la inversión principalmente es menor (costos de implantación y manutención), producción pequeña de lodos excedentes, consumo pequeño de energía eléctrica y simplicidad del funcionamiento (Ramírez y Koetz, 1998). Ellos son económicos energéticamente y ecológicamente.

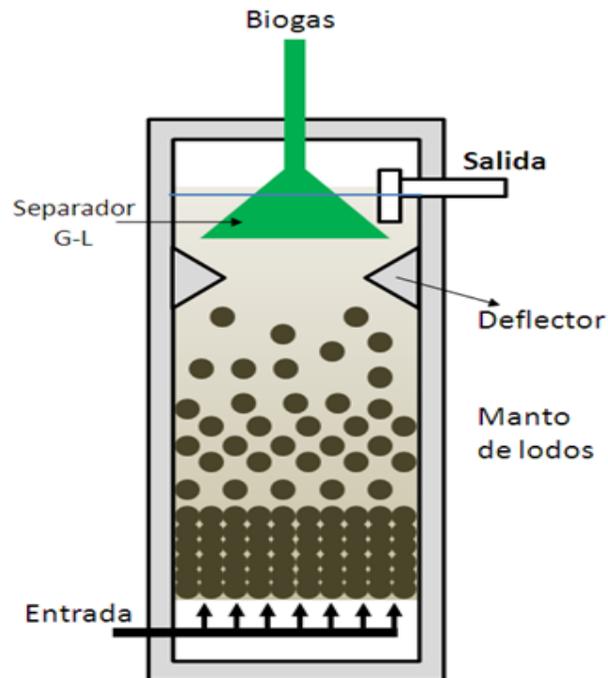
Teniendo en cuenta que el consumo energético es bajo y que la operación no es compleja, los costos totales de operación son bajos; esto unido a nuestro clima tropical donde la producción de metano se maximiza, hace que la digestión anaerobia con estos reactores se convierta en una alternativa atractiva desde el punto de vista técnico-económico-social. Además de las ventajas intrínsecas de los procesos anaerobios, a través de estos procesos se obtienen subproductos los cuales pueden ser utilizados posteriormente, obteniéndose beneficios apreciables de su aprovechamiento. Estos son: *f* Biogás: Producto gaseoso que puede ser empleado como combustible. Según los reportes energéticos 1 m³ de biogás equivale a 0.55 L de fuel-oil. Este puede sustituir parte del combustible (60 %) que se consume en las calderas de las propias plantas de destilación.

Lodo: Estudios realizados han demostrado que su composición guarda riquezas en cuanto al contenido de materia orgánica y mineral, pudiendo emplearse como biofertilizante y mejorador de suelos (Rodríguez et al., 1998). También se ha mostrado que debido a su composición aminoacídica, calidad sanitaria, concentraciones de nitrógeno y proteína bruta; puede ser utilizado como alimento animal (Figuroa, 1993; Pérez, 1997; Pérez 1998).

Efluente líquido: Según los resultados obtenidos en investigaciones, se ha demostrado que este conserva nitrógeno en forma fácilmente asimilable y otros iones los cuales enriquecen

este residuo y lo hacen propicio para su uso en fertirriego. (Bermúdez, Rodríguez, Martínez, & Terry)

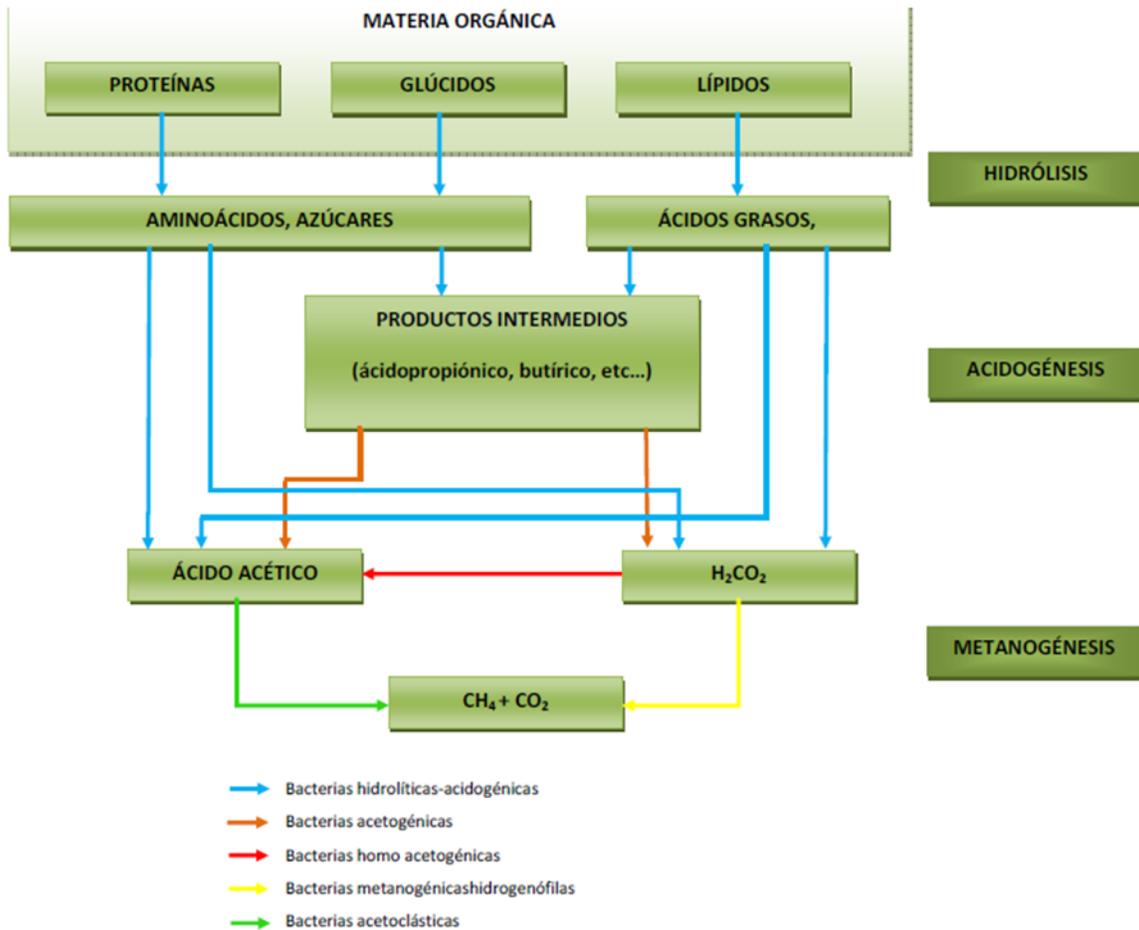
Ilustración 7 Esquema reactor UASB



Proceso de digestión anaerobia en un reactor UASB

El proceso de digestión anaerobia es un proceso que requiere el cumplimiento de ciertas condiciones para que sea exitoso y eficiente en el tratamiento de aguas residuales y lixiviados por ello es necesaria la intervención de un gran número de microorganismos, bajo unas condiciones ambientales determinadas, los cuales actúan en una serie de etapas y reacciones muy específicas. (PEÑA, 2017)

Ilustración 8 Etapas degradación materia orgánica



Fuente: Rozo, 2018

Las cuatro etapas fundamentales en el proceso de digestión anaerobia son:

- Hidrolítica en esta etapa los componentes de alto peso molecular, tales como proteínas y polisacáridos, son degradados en sustancias solubles de bajo peso molecular tales como aminoácidos y azúcares.

- Acidogénica los compuestos orgánicos son convertidos en ácidos grasos por lo cual baja el pH del sistema.
- Acetogénica los ácidos generados en la etapa anterior son ácidos de cadena larga (ácido propanoico, butanoico y otros) los cuales se degradan a ácido acético
- Metanogénica el ácido acético se convierte en metano y dióxido de carbono El metano también se puede producir a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, así como también de metanol y metilaminas. También se pueden producir pequeñas cantidades de nitrógeno (procesos de nitrificación-desnitrificación) y sulfuro de hidrógeno (procesos de desulfatación). El conjunto de todos los gases originados en la digestión anaerobia se conoce como biogás.

Parámetros de operación en un reactor UASB

Debido a la gran cantidad y diversidad de microorganismos que intervienen en el proceso, además de las reacciones que se generan en la digestión anaerobia, existen un gran número de parámetros que intervienen directamente en el desempeño del reactor, debido a ello se debe realizar una optimización de cada una de las etapas que se llevan a cabo.

PH: El PH o potencial de hidrógeno es una medida que define la concentración de iones de hidrógeno presentes en el agua, con esto se determina la naturaleza de ésta y se clasifica en básica o alcalina (valores de PH mayores a 7), o ácida (valores de PH menores a 7). Este parámetro es de gran importancia, debido a que de éste depende que muchos procesos químicos y biológicos del agua se puedan realizar, además de que los modelos de equilibrio

“describen la adsorción de especies iónicas sobre adsorbentes con cargas superficiales variables. Que son procesos fuertemente dependientes del pH (SANCHEZ & LIZCANO, 2013)

DBO5: Según Henry y Heinke, 1999 es la “Cantidad medida de oxígeno que requieren microorganismos aclimatados para degradar biológicamente la materia orgánica de las aguas residuales. Es el parámetro de mayor importancia a tener en cuenta en la contaminación de agua, es un estimativo de la contaminación orgánica” citado en (SANCHEZ & LIZCANO, 2013)

DQO: Según (Leon & Fajardo, 2005) Se constituye en una prueba más rápida que la demanda bioquímica de oxígeno y es utilizada para medir la carga orgánica e inorgánica contenida en una muestra. En el bioensayo, la DBO, oxida las sustancias orgánicas fácilmente biodegradables, si se realizan bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y población biológica. En este ensayo químico, la DQO, se oxidan además de las sustancias antes mencionadas, todas aquellas que sean susceptibles de ser atacadas por un oxidante fuerte en condiciones ácidas. El inconveniente que presenta es que no determina si la materia orgánica es biodegradable o no (PEÑA, 2017)

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST): El promedio del Total de Sólidos en Suspensión (SST) en el recurso hídrico corresponde a la suma de los valores del Total de Sólidos en Suspensión (SST) por punto de muestreo dividido por el número de puntos de muestreo. Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. (SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES)

3.3 MARCO LEGAL

Tomando como referencia la normatividad colombiana se extrajo la legislación a tener en cuenta en la aplicación del trabajo de investigación destacando las normas de conservación del medio ambiente, contaminación por lixiviados y vertimientos a cuerpos receptores de agua.

Norma	Descripción
Ley 23 del 12 de diciembre de 1973	Concede facultades extraordinarias al presidente de la República para expedir el código de Recursos Naturales y de protección al medio ambiente, para la prevención y control de la contaminación del medio ambiente. La búsqueda del mejoramiento, conservación y restauración de los Recursos Naturales Renovables y la defensa de la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio Nacional. Fue la primera norma en imprimirle responsabilidad a quienes causen daño al medio ambiente.
Decreto N° 2811 de diciembre 18 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 9 de enero	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias

24 de 1979	
Decreto 2104 de 1983.	A través de este decreto el Ministerio de salud se regulan las actividades de almacenamiento, recolección, transporte, disposición sanitaria y aspectos relacionados con las basuras, para efectos de carácter sanitario. La prestación del servicio de aseo se clasifica en dos modalidades servicio ordinario y servicio especial
Decreto N° 1594 de junio 26 de 1984	Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I – del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y vertimientos de residuos líquidos.
Resolución N° 2309 de 1986	Dicta normas para el manejo de residuos especiales, su almacenamiento transporte tratamiento y demás medidas generales
Ley 99 de diciembre 22 de 1993.	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
Resolución N° 1096/ Reglamento interno del sector agua potable y	. Presenta principios fundamentales y criterios operacionales que deben seguir para realizar una adecuada gestión de residuos sólidos y peligrosos en todos los componentes con miras a la minimización de riesgos a la salud y el medio ambiente durante

<p>saneamiento básico. RAS 2000</p>	<p>dicha gestión</p>
<p>Ley 715 de 2001</p>	<p>Establece el sistema general de participaciones, constituido por los recursos que la nación transfiere a las entidades territoriales.</p> <p>Los artículos 3 y 76 establecen la “participación de propósito general” que incluye recursos para el agua potable y saneamiento básico, entre otras para promover, financiar y cofinanciar proyectos de descontaminación de corrientes afectadas por vertimientos, así como programas de disposición, eliminación y reciclaje de residuos líquidos y sólidos.</p>
<p>Decreto N° 1713 de 6 de agosto de 2002</p>	<p>Mediante el cual el Gobierno Nacional reglamento la Ley 142 de 1994, Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del Servicio Público de Aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1994 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.</p>
<p>Resolución N° 1045 del 26 septiembre de 2003</p>	<p>Que mediante el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial adopto la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS, establece los plazos para iniciar la implementación de los PGIRS y para la clausura y restauración ambiental de los botaderos a cielo abierto y de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos que no cumplan con la Normatividad Vigente a su adecuación a</p>

	Rellenos Sanitario.
Decreto 838 de marzo de 2005.	<p>Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones, dentro de las cuales se establece el control y monitoreo en el área de disposición final de residuos sólidos. Todo prestador del servicio público de aseo en la actividad complementaria de disposición final de residuos sólidos, deberá incluir en los diseños correspondientes la red de monitoreo de aguas subterráneas, la identificación de las fuentes superficiales y los puntos donde se realizará el control y monitoreo, sin perjuicio de lo dispuesto en la licencia Ambiental</p>
Decreto N° 3930 de 2010	<p>Establece los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público</p>
Decreto N° 4728 de 2010	<p>"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010"</p>

3.4 ESTADO DEL ARTE

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UNIVERSIDAD LIBRE SEDE BOSQUE POPULAR POR MEDIO DEL SISTEMA DE REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE UASB A ESCALA PILOTO, BOGOTÁ, COLOMBIA.

En este trabajo se muestra la evaluación de un tratamiento biológico secundario para las aguas residuales generadas en la Universidad Libre sede bosque popular en la ciudad de Bogotá, por medio de un reactor anaerobio de flujo ascendente el cual fue diseñado y construido a escala piloto, se realizó el diseño del reactor a partir del manejo de caudales con los cuales se obtiene una velocidad de flujo tal que el sistema sea eficiente. Con el fin de evaluar la eficiencia u operación de dicho tratamiento se tuvieron en cuenta y se analizaron los parámetros de: Turbidez, Acidez, Alcalinidad, Temperatura, pH, ORP (Potencial de Oxido Reducción), DQO (Demanda Química de Oxígeno), SST (Solidos Suspendidos Totales), AOV (Ácidos Orgánicos Volátiles), G y A (Grasas y Aceites), además se analizaron parámetros del comportamiento cinético del reactor para obtener el tiempo de retención hidráulico recomendable para el óptimo funcionamiento del tratamiento, esta evaluación se llevó a cabo mediante la toma de muestras y la realización de análisis físicos y químicos siguiendo las técnicas del Standars Methods.

El tiempo de operación del sistema fue de 206 días, el cual fue dividido en 2 periodos denominados como periodo de arranque y periodo de estabilización, donde el primer periodo fue de una duración de 162 días, procedimiento que fue maniobrado bajo

recirculación total del efluente hasta que según resultado de análisis de muestras fue demostrado el crecimiento de la biopelícula; evidenciando la remoción óptima de cada uno de los parámetros de investigación. La segunda etapa fue dada a partir del día 163 hasta el día 206 donde se evaluó el comportamiento del sistema con diversos tiempos de retención hidráulica calculando el mayor porcentaje de remoción en cada uno de los parámetros a investigar. Según los resultados dados, los parámetros recomendables para el óptimo funcionamiento del reactor son: Trabajar con la Bomba Dosificadora a una potencia de 5% para que en la alimentación del reactor se maneje un caudal de 0,034 L/min con el cual se logra un tiempo de retención de 6,26 horas, mostrando un porcentaje de remoción máximo de un 95,24% de DQO, 87,24% de SST y 96,12% de GYA. (Pinilla & Martinez, 2013)

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE REACTORES UASB EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Esta investigación se llevó a cabo en la PTAR Rio Frio en la ciudad de Bucaramanga; la cual funciona desde 1990. Se evaluó la eficiencia de los reactores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) durante un periodo de 9 años. Se evaluaron los reactores UASB mediante los registros operativos de seguimiento de los parámetros de caudal y calidad del agua tomados periódicamente en el afluente al sistema preliminar y el efluente de cada uno de los UASB que funcionaron desde el año 2006. Para la investigación se tomaron los parámetros DQO, DBO₅, SS, Alcalinidad, AGV, y temperatura. El pH se tomó cada 6 horas en los puntos anteriormente mencionados. La PTAR trata un caudal promedio de 500 l/s, con eficiencias de remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos (SS) de 66 %, 52 % y 60 %, respectivamente. La producción de biogás alcanzó 37541 m³/mes (82.4% de metano), y con

una producción de lodo de 334 m³/mes. El tiempo de retención hidráulico (TRH, Θ) estuvo entre 7 y 8 horas, intervalo típico de sistemas UASB para una temperatura de 26 °C. No se encontró remoción de nitrógeno y fósforo. Las eficiencias, y resultados similares en Indonesia y América Latina, sirven para concluir que la digestión anaeróbica es un proceso promisorio para el pretratamiento de aguas residuales en países tropicales. (Larrota, García, Torres, & Mejía, 2018)

TRATAMIENTO BIOLÓGICO DEL LIXIVIADO GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO “EL GUAYABAL” DE LA CIUDAD SAN JOSÉ DE CÚCUTA

En este trabajo se realizó un diagnóstico de calidad y cantidad del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta, y se evaluaron dos sistemas de tratamiento biológico a escala laboratorio para este lixiviado.

El lixiviado en el momento de la experiencia presentaba un rango de DQO de 7.650 a 28.250 mg/L. Los sistemas de tratamiento ensayados fueron: un reactor anaerobio del tipo UASB y un sistema de Biodiscos. La carga máxima asimilada por el sistema de Biodiscos fue de 31 gDQO/m²*d, con una eficiencia de remoción promedio en DQO de 70% y eficiencias de remoción máximas por encima del 90% para una carga óptima en un rango de 15 a 20 gDQO/m²*d; además, este sistema presentó gran estabilidad frente a variaciones importantes en cuanto a las características del lixiviado y ausencia de olores desagradables. Los porcentajes de remoción de DQO en el reactor UASB eran muy variables, con picos bajos y caídas muy marcadas, que indican que no se presentaba un funcionamiento óptimo del proceso durante la mayor parte del período de operación del reactor UASB; esto se

debió principalmente a que no se tuvieron en cuenta las estrictas condiciones de este sistema. (Contreras & Suárez, 2006)

TRATAMIENTO INDUSTRIAL DE VINAZAS DE DESTILERÍAS EN REACTORES UASB

La digestión anaerobia en reactores UASB es muy utilizada desde los años 80' en países latinoamericanos, a escala industrial, para tratar efluentes líquidos, entre ellos, las vinazas de destilerías. De ahí la importancia de mostrar las ecuaciones de diseño y los resultados de la potencialidad de una planta de biogás, utilizando un caso de estudio industrial, en el tratamiento en reactores UASB de las vinazas de una destilería de 500 HL etanol/d, presentados como objetivo principal del trabajo. Se muestra además, el diagrama de flujo de esta tecnología y se explican sus etapas. Los resultados de los balances de masa demostraron que para tratar toda la vinaza generada con 50 kg DQO/m³, para su conversión en energía eléctrica, es necesaria la instalación de 2 reactores de 1160 m³ cada uno; siendo las potencialidades de producción de esta tecnología de: 12821 m³ biogás desulfurado/día, 21796 kWh eléctrico, 4,33 t/día lodo seco y 716 m³ vinaza/día con 15 kg DQO/m³, que pueden ser utilizadas en el fertirriego del cultivo de la caña de azúcar, como opción de cierre de ciclo de tratamiento y disposición de corrientes residuales. Ello evidencia, que la digestión anaerobia de vinazas de destilerías, tratadas en reactores UASB como opción de tratamiento primario y cierre de ciclo con fertirriego, hace a la producción de etanol ser amigable con el medio ambiente. (Acosta, Doménech-López, & Eng-Sánchez, 2015)

PROPUESTA DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN REACTOR UASB PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS

En este trabajo se evaluó el comportamiento y eficiencia de un reactor UASB de 1 m³ alimentado con aguas residuales de la crianza intensiva de cerdos, y se buscaron valores para los parámetros tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica (VCO) que orienten el diseño de instalaciones industriales. Con este fin, el reactor se operó bajo diferentes TRH. La eficiencia del reactor UASB en la remoción de DQO total y de sólidos suspendidos totales (SST) estuvo condicionada por la VCO y TRH aplicados, así como por la concentración de SST en el influente. Aplicando un tiempo de residencia hidráulico de 4 días (VCO promedio de 1,6 kg.m⁻³.d⁻¹), el reactor UASB alcanzó una eficiencia promedio de remoción de DQO total de 77,4 %. Trabajando con un TRH de 3 días a VCO promedio de 2,1 y 2,4 kg.m⁻³.d⁻¹, la remoción promedio de DQO total presentó valores de 72,1 y 70,7%, respectivamente, y la remoción de SST alcanzó valores promedio de 52,0 y 60,2%. En base a los resultados obtenidos, se proponen como valores a considerar en el diseño de reactores UASB para el tratamiento de efluentes porcinos con características similares a las presentadas en este estudio, VCO de 2,3 kg.m⁻³.d⁻¹ y TRH igual a 3 días, para garantizar la estabilidad del proceso. (Pacco, Vela, & Miglio, 2018)

COMPARACIÓN DE CUATRO TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS DE LIXIVIADOS

En este estudio se presentan los resultados de cuatro tratamientos fisicoquímicos aplicados a los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida: coagulación–floculación,

flotación, adsorción y oxidación Fenton. Los procesos coagulación–floculación y flotación consisten en la remoción de partículas suspendidas mediante la adición de sustancias químicas (coagulantes). Ambos resultaron poco eficientes dado que los lixiviados estudiados poseen bajas concentraciones de sólidos suspendidos. No se encontraron en la literatura experiencias exitosas de estos tratamientos y, en concordancia, se comprobó que los lixiviados de los rellenos sanitarios poseen bajas concentraciones de sólidos suspendidos, lo cual explica la baja eficiencia de remoción. La mayor parte de las partículas suspendidas de los lixiviados estudiados tenían tamaños en el rango de 0 a 75 μm , con una media de 23 μm , los cuales corresponden a partículas coloidales que dan color al lixiviado. La remoción de este tipo de partículas se realiza a valores bajos de pH. Por este motivo, las mejores remociones fueron de 40 % a valores de $\text{pH} < 2$ para el proceso coagulación–floculación y de 37 % a $\text{pH} 2$ para la flotación. Con el proceso de adsorción se pueden eliminar sólidos suspendidos y disueltos, por lo que se pueden obtener mejores remociones que con los procesos de coagulación–floculación y flotación, en los que sólo se remueven sólidos suspendidos. No obstante, resulta un proceso costoso debido a la necesidad de regenerar el carbón activado. En la prueba de adsorción, las eficiencias de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) se redujeron de 60 a 30 % durante las primeras 80 horas cuando el tiempo de retención fue de ocho horas, y durante las primeras 60 horas cuando el tiempo de retención fue de cuatro horas. En el proceso de oxidación, la carga contaminante se trata con una combinación de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso (reactivo Fenton), típicamente a presión atmosférica y temperatura entre 20 y 40 °C. Las condiciones óptimas del reactivo Fenton se obtienen a valores ácidos de pH y con ellas se pueden alcanzar altas remociones de los contaminantes orgánicos. Las condiciones y dosis óptimas del proceso de oxidación fueron: tiempo de contacto 20 minutos, $\text{pH} 4$,

concentraciones de H_2O_2 de 600 mg/L y Fe^{2+} de 1000 mg/L. Las mejores remociones alcanzadas fueron de 78 % para la DQO y 87 % para el carbón orgánico total (COT), por lo que resultó el tratamiento más eficiente entre los probados en el estudio. (NOVELO, y otros, 2009)

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS GENERADOS EN EL BOTADERO DEL CANTÓN FRANCISCO DE ORELLANA

Se diseñó un sistema de tratamiento para lixiviados generados en el Botadero del Cantón Francisco de Orellana, con el fin de cumplir con la normativa vigente para límites máximos permisibles de descarga a cuerpos de agua dulce del TULSMA. Se realizó un diagnóstico zonal del Botadero, determinando el método suizo como idóneo para la cuantificación del caudal obteniendo un resultado de 1,73 L/s. Se caracterizó el lixiviado mediante métodos estándar de muestreo de aguas y se obtuvo la caracterización físico-química y biológica del lixiviado, se identificó que los parámetros fuera del límite máximo permisible son: DBO5 334,50 mg/L, DQO 836,80 mg/L, Coliformes fecales 911500 NMP/100ml, Coliformes totales 1205000 Col/100ml, Amonio (NH_4) 161,48 mg/L, Nitrógeno total 308,43 mg/L y Sólidos totales 2697,24 mg/L. Con estos resultados se propuso el sistema de tratamiento de lixiviados, que consta de los siguientes componentes: dos piscinas de almacenamiento, una canaleta parshall, dos floculadores para la etapa de coagulación - floculación con sulfato de aluminio, dos sedimentadores convencionales, dos lechos de secado de lodos con una caja de registro, cuatro humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical empleando pasto alemán y una caja de salida, registro o recirculación del agua tratada. Se determinó la eficiencia de dichos tratamientos mediante pruebas de tratabilidad, dando los siguientes

porcentajes de remoción para la coagulación con sulfato de aluminio: DBO5 50%, DQO 49,20%, Nitrógeno total 2,09% y Coliformes totales 58%; y los porcentajes de remoción del humedal artificial fueron de: DBO5 86 %, DQO 83 %, Nitrógeno total 97 %, Amonio 64 %, Coliformes fecales 99,99 %, Coliformes Totales 99,99 % y Sólidos totales 53 %. Se concluyó que los parámetros se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, evidenciando de esta manera un sistema fiable y viable para el tratamiento de los lixiviados del Botadero del Cantón Francisco de Orellana. (MONTEZUMA, 2019)

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS DEL CANTÓN LA CONCORDIA DE LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS

En este trabajo de grado se diseñó un sistema de tratamiento para los lixiviados generados en el cantón La Concordia de la provincia de Santo domingo de los Tsáchilas para minimizar la contaminación. Para el desarrollo del mismo se realizó una caracterización inicial para establecer los parámetros que se encontraban fuera de norma, los cuales fueron DQO, DBO5, Nitrógeno Amoniacal, Sólidos totales suspendidos, Sólidos totales, Coliformes fecales y totales. En primer lugar se calculó el índice de biodegradabilidad obteniéndose un valor de 0,226 lo que me define un tratamiento Físico Químico, por esta razón se llevó a cabo tres tratamientos. Los cuales constan Tratamiento 1 de carácter físico –químico, Tratamiento 2 combinado aireación previa seguida del físico-químico y Tratamiento 3 aplicación de microorganismos en un reactor aerobio. El porcentaje de remoción obtenido del tratamiento 1 fue: para el DQO 2,38% y DBO5 un 50%, Tratamiento 2 un DQO con 8,04% y un DBO5 con un 31,87 %, finalmente el Tratamiento

3 se observó una remoción del 92,86% para el DQO y 77,63% para el DBO5. De acuerdo a lo descrito se escogió el tercer tratamiento como el más eficiente y adecuado para realizar el diseño. Para la aplicación de los microorganismos se empleó una concentración del 5% de EM1 en estado latente, 5% melaza, 90% agua para su activación. De esta solución se dosificó una dosis óptima de 1: 1000 ml a los lixiviados en el tanque aerobio. Finalmente se escogió los parámetros de diseño y se estableció de la siguiente forma: tanques de recepción para el almacenamiento y distribución del lixiviado, un reactor biológico de tipo aerobio, un sedimentador secundario y un tanque de recolección de lodos. (DAVALOS, 2018)

CLARIFICACIÓN FISICOQUÍMICA DE LIXIVIADOS MEDIANTE PROCESOS DE COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DEL BOTADERO MUNICIPAL DE LA PROVINCIA DE MOYOBAMBA

Ante la problemática que se genera en los rellenos sanitarios con respecto a los lixiviados el presente trabajo se ha enfocado en la búsqueda de una alternativa de solución a través del tratamiento fisicoquímico del lixiviado generado por el botadero municipal de la provincia de Moyobamba, que consiste en la remoción de partículas suspendidas por acción de dos productos por separado el sulfato de aluminio tipo A y el cloruro férrico, mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación. Los elementos para el éxito de este proceso han sido determinar la dosis óptima del coagulante y el pH óptimo al que ocurre la mayor remoción de turbidez y DBO5, luego de un pre tratamiento de sedimentación física y floculación biológica. De esta forma la presente investigación demuestra que la clarificación fisicoquímica es una tecnología apropiada para este tipo de lixiviado, según

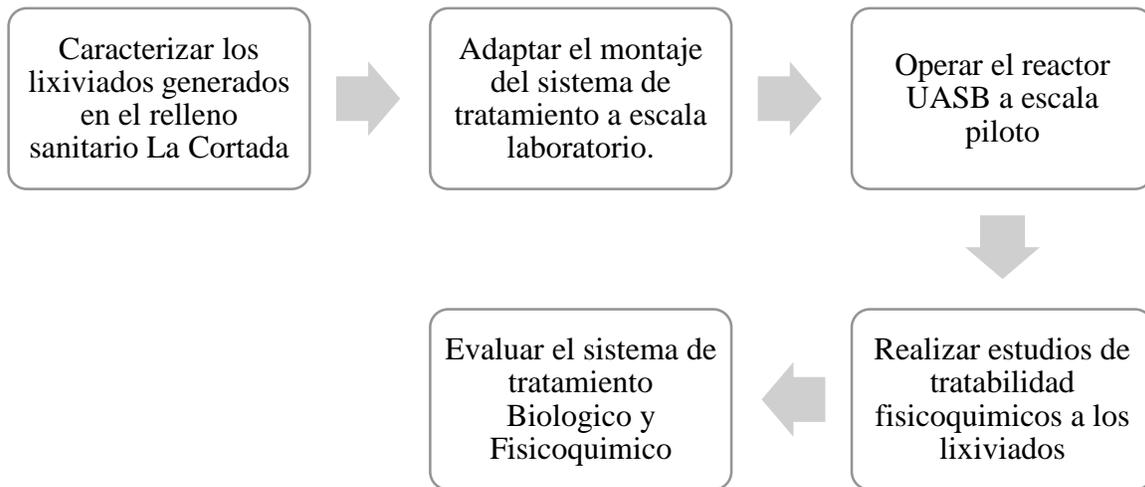
los resultados, se obtuvo una considerable disminución de la carga orgánica evaluada, las eficiencias de las pruebas con lixiviado pre tratado estiman disminuciones de entre 43.75% a 51.88% para la turbidez y de entre 91.78% a 96.93% para el DBO5, lográndose disminuir significativamente los parámetros fisicoquímicos en los lixiviados, y constituyéndose como alternativa de solución frente a esta problemática y a la carencia de un relleno sanitario en la provincia de Moyobamba. (Irigoín & Zaldivar, 2016)

4. METODOLOGÍA

El presente trabajo se ha realizado con el fin de evaluar la eficiencia de un tren de tratamiento conformado por un reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodos y un proceso fisicoquímico determinado por los procesos de coagulación, floculación y sedimentación para los lixiviados generados en el relleno sanitario la cortada en el municipio de Pamplona; cumpliendo así un objetivo general que es visualizar si la combinación de estos procesos generan una alta remoción de materia orgánica mediante pruebas de DQO realizadas en el laboratorio de control de calidad de la universidad de pamplona..

Para llevar a cabo la investigación se realizan secuencialmente los siguientes pasos:

Ilustración 3 Etapas de Metodología



Fuente: Autor

A continuación se describirán las actividades realizadas en todas las etapas anteriormente mencionadas y el lugar donde fueron desarrolladas para el cumplimiento de cada una de ellas, que lleve al final el cumplimiento del objetivo general de la investigación que es realizar a escala laboratorio un tratamiento biológico y fisicoquímico para los lixiviados generados en el relleno sanitario La Cortada para determinar su eficiencia en remoción de materia orgánica:

4.1 Lugar de Ejecución:

4.1.1 Universidad de Pamplona

La universidad de Pamplona sede principal está localizada en el municipio de Pamplona en el Km 1 Vía Bucaramanga. La universidad cuenta con el laboratorio de Agua, Aire y Suelo donde se realizó el montaje del tratamiento y posteriormente es utilizado para ejecutar el

proyecto planteado. Para la caracterización del lixiviado, y determinación de DQO para preparación de sustrato, monitoreo y porcentaje de remoción de materia orgánica se trabajó en el laboratorio de Control de Calidad también ubicado en las instalaciones de la universidad.



Fuente: Rozo 2018

4.2 Caracterización del Lixiviado

Este primer proceso se lleva a cabo recolectando una muestra puntual de lixiviado que en nuestro caso será el sustrato utilizado en todo los procesos de la investigación. La muestra de lixiviado se recolecta de unos de los tanques de almacenamiento de lixiviados del relleno sanitario la Cortada. Esta muestra de aproximadamente 1 Litro fue almacenada en un recipiente de plástico y posteriormente refrigerada a 4°C para conservar sus características.

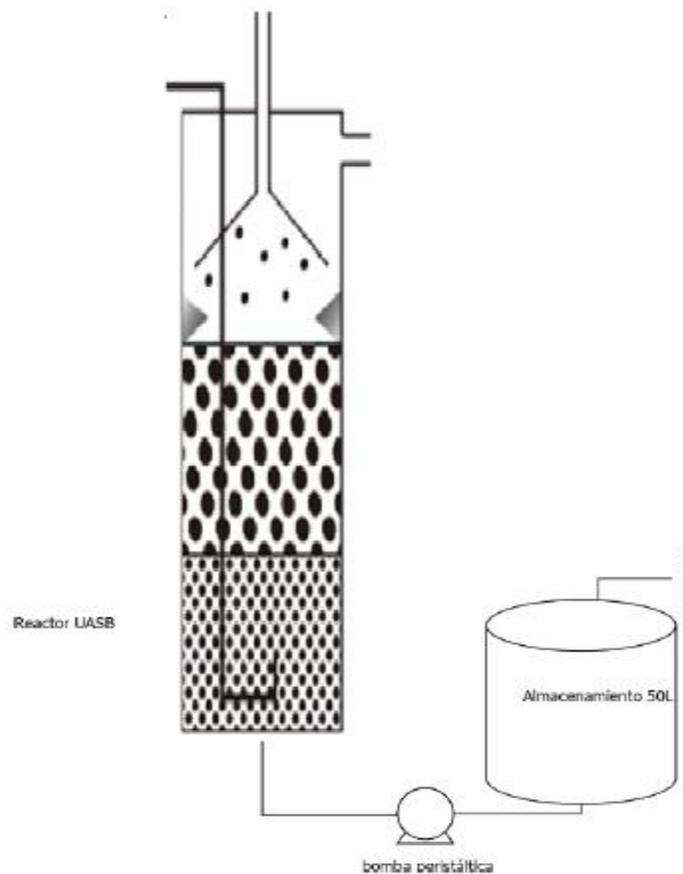
Con el fin de conocer las principales características físico-químicas del sustrato, la muestra recolectada es analizada en el laboratorio Control De Calidad de la universidad de pamplona, donde los parámetros físico-químicos analizados en el sustrato fueron las

siguientes: DQO, DBO5, alcalinidad, dureza, acidez, nitritos, cloruros, sulfatos, fosfatos, pH, turbiedad, ST, SST y SSV. Estas pruebas se realizaron por métodos estándares, siguiendo la metodología descrita en la guía de Bioprocesos de la Universidad de Pamplona.

4.3 Adaptación del montaje del sistema de tratamiento de lixiviado a escala laboratorio

4.3.1 Sistema de Alimentación

El sistema de alimentación garantiza el suministro del sustrato y el caudal de operación para el sistema de tratamiento propuesto en esta investigación. Se dispuso de un almacenamiento que proporciona por bombeo el afluente de forma ascendente y presurizada al reactor UASB con un caudal constante como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: Peña, 2017

4.3.2 Sistema controlador de temperatura

Para lograr mantener la temperatura constante en el tanque de almacenamiento y en el reactor, se implementa un sistema de calentamiento construido con la colaboración del Ingeniero Electrónico Carlos Vides, usado anteriormente en el trabajo de grado de Peña, A. Y Maldonado J.I. (2017) y seguidamente por (Rozo V., & Maldonado J.I., 2018), (López Sepúlveda, Jiménez Rojas, & Maldonado J.I., 2017).

El sistema consta de una resistencia de estufa eléctrica de 110 voltios, la cual proporciona calor al tanque de alimentación de aluminio, un controlador electrónico y termocupla interconectados entre sí, quienes se encargan de encender y apagar las resistencias asegurando así de mantener la temperatura constante en el tanque de alimentación.

Complementado el sistema, con el fin de evitar pérdidas de calor debido a la incidencia de la temperatura ambiente (15°C), y para garantizar que el reactor UASB mantuviera la temperatura de elegida, se hace uso de un cerramiento tipo invernadero con plástico y un calefactor de 1500 W encendido contantemente.

4.3.3 Montaje Tratamiento anaerobio

El tratamiento anaerobio para los lixiviados es el primer proceso propuesto que se realizara mediante la tecnología de reactores anaerobios que en este caso será un reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) construido a escala laboratorio del cual dispone el grupo de investigaciones GIAAS en el laboratorio de Agua, Aire y Suelo.

4.3.4 Tratamiento Físicoquímico

Para el montaje del tratamiento físicoquímico dispondremos de las unidades que se encuentran en el laboratorio de hidráulica, las unidades utilizadas serán mezclador rápido, floculador hidráulico y sedimentador de placas planas de alta tasa. Estas unidades serán transportadas al laboratorio de agua aire y suelo para ser acopladas al sistema anaerobio (UASB) y por poder adaptar todo el sistema para el tratamiento del lixiviado a escala laboratorio.

4.3.5 Diseño y adecuación del reactor UASB

El reactor UASB está construido a escala laboratorio de forma cilíndrica ya que esta forma presenta ventajas hidrodinámicas como por ejemplo la no formación de zonas muerta. El reactor está construido de material acrílico debido a su facilidad de manejo y resistencia a la corrosión y degradación; también permite visualizar los posibles taponamientos por lodo.

Para su operación se han tenido en cuenta las siguientes recomendaciones:

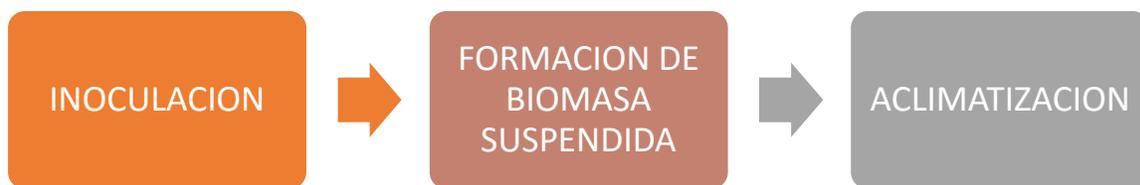
- Según la literatura consultada el tratamiento en reactores UASB presenta mejor eficiencias a ciertas temperaturas. La temperatura seleccionada para la operación del reactor UASB será de 20°C; para este parámetro se instaló un sistema controlador el cual mantendrá constante la temperatura seleccionada.
- El TRH según ROMERO ROJAS, 2000 para la temperatura 20°C debe ser 7 a 9, para la operación de UASB asumiremos un TRH de 9 horas.
- El caudal de diseño se determinó teniendo en cuenta la capacidad de la bomba peristática la cual se encuentra disponible en el laboratorio de Agua, Air y suelo de la Universidad de Pamplona.

4.4 Operación del reactor UASB a escala de laboratorio

Para operar el reactor UASB se debe iniciar por el arranque y su respectiva estabilización lo cual se logra mediante unas etapas descritas a continuación.

4.4.1 Arranque del Reactor UASB

La fase de arranque del reactor se realizó en tres etapas:



4.4.1.1 INOCULACIÓN

Para el inocular el reactor uasb se utilizó como inocular excretas de cerdos frescas debido a su gran variabilidad microbológica, recolectadas de un criadero de cerdos a las afuera del municipio de pamplona. Para la preparación del inocular se diluyó las excretas de cerdos con agua potable, posteriormente se filtra la mezcla y se dispone de la solución en el reactor uasb, un 25 % del volumen total del reactor, el volumen restante se completó con agua residual y se recirculo por 1 día.

4.4.1.2 FORMACIÓN DE BIOMASA

Una vez realizada la inoculación se procedió alimentar y recircular al reactor agua residual municipal, recolectada de un colector final en el municipio de pamplona, durante un

periodo de tres días, con un caudal constante con el objetivo que la velocidad ascensional no superara los límites de arrastre de las bacterias en la primera fase y se lograra la formación de la biomasa suspendida. (PEÑA, 2017)

4.4.1.3 CLIMATIZACIÓN

Al terminar los 3 días de recirculación con agua residual, comienza la tercera etapa del arranque que consistió en completar el volumen total del reactor con lixiviado sin recircular. Esta alimentación al reactor se realiza agregando un volumen diariamente de lixiviado equivalente al 10% del volumen total del sistema de tratamiento hasta lograr el 100% del sustrato en el Reactor, y de la misma manera disminuyendo la alimentación con agua residual hasta llegar al 0%. El sustrato deberá tener una concentración específica debido a su variable concentración. La alimentación diaria se realizó de la siguiente manera.

Tabla 2 Volumen alimentación

DIA	% AGUA RESIDUAL	% LIXIVIADO
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	40	60
8	30	70
9	20	80
10	10	90
11	0	100

Fuente: Autor

4.4.2 PREPARACIÓN DEL SUSTRATO

Debido a la variabilidad de concentración que presenta el lixiviado, debe prepararse el sustrato para alimentar el reactor. Esto mediante una dilución del lixiviado recolectado del relleno sanitario la cortada de Pamplona con agua potable, para ellos inicialmente se realiza la medición de DQO para poder conocer la concentración real de materia orgánica que este presenta, seguidamente se realiza una solución con agua potable y lixiviado para obtener la concentración de DQO requerida para alimentar al reactor uasb. Para preparar el sustrato y llegar a la COV requerida se aplica la siguiente ecuación.

Ecuación 1 Preparación de sustrato

$$C_1 \cdot v_1 = C_2 \cdot v_2$$

Dónde:

C_1 = Concentración real del lixiviado

V_1 = Volumen necesario de lixiviado para la dilución

C_2 = Concentración deseada para el sustrato de alimentación

V_2 = Volumen final del sustrato de alimentación

4.4.3 CAUDAL

Para la alimentación del sustrato al reactor, el caudal es controlado por una bomba peristáltica la cual succiona desde el tanque de almacenamiento hasta el uasb, para posteriormente ser impulsado a través de un ducto de diámetro ½ pulgada ubicado en la parte inferior del UASB, garantizando un caudal de operación constante tal que permita un tiempo de retención hidráulica entre las horas recomendado por Romero Rojas, (2000) para la temperatura establecida.

Ecuación 2 Caudal de operación

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

Donde:

Q: Caudal de Operación UASB

V: Volumen del UASB

TRH: Tiempo de retención hidráulico

4.4.4 CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA

Se estudia el comportamiento del reactor UASB con una Carga Orgánica Volumétrica; estudiada en la tesis de (PEÑA, 2017) la cual de tres COV operadas fue con la que mejor eficiencia se obtuvo, esta COV se logra por medio de diluciones realizadas al lixiviado concentrado proveniente del relleno sanitario.

Ecuación 3 Carga Orgánica Volumétrica

$$COV = \frac{Q \cdot [DQO]}{V}$$

Donde:

COV: Carga Orgánica Volumétrica aplicada al UASB

Q: Caudal de Operación

DQO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

V: Volumen del UASB

4.4.5 Parámetros y cronograma de monitoreo

Para el muestreo del sistema de tratamiento de lixiviado y su respectiva evaluación, se han establecido ciertos puntos de seguimiento, los cuales están distribuidos de la siguiente manera: de la entrada a la salida del sistema, se tienen dos puntos, se monitorea la entrada del reactor UASB y a la salida del reactor (efluente). Se distribuye de esta manera con el fin de hacer seguimiento al comportamiento de DQO y obtener la eficiencia del tratamiento

anaerobio los cuales fueron los parámetros de control en esta investigación. El monitoreo se empezara cuando el reactor este completamente alimentado con lixiviado.

La medición de los parámetros de control, se realizó tres veces por semana midiendo cada uno de estos una vez al día, cada día por medio, además de alternar los días de muestreo entre una semana y otra de la siguiente manera:

Tabla 3 Cronograma monitoreo

PARÁMETRO	SEMANA 1					SEMANA 2				
	L	M	MI	J	V	L	M	MI	J	V
DQO	X		X		X	X		X		X

Fuente: Autor

4.5 Diseñar el sistema de tratamiento de lixiviado

Cuando el reactor UASB este alimentado en su totalidad con lixiviado, el efluente del UASB será recolectado y conducido al laboratorio de control de calidad donde se realizara las pruebas de tratabilidad. Después de haber determinado las dosis optima de coagulante esta será utilizada para dosificar a nivel de laboratorio el efluente dispuesto a la unidad del mezclador rápido para el proceso de coagulación, después al floculador hidráulico y por ultimo al sedimentador.

4.5.1 Determinación dosis optima de coagulante

Se recolectara el efluente del reactor, aproximadamente 6 litros y se realizara prueba de jarras en el laboratorio de control de calidad para determinar la dosis óptima de coagulante para la remoción de materia orgánica. La dosis la aplicaremos volumétricamente y mediante el floculador mecánico del laboratorio le haremos el proceso de mezclado, floculación y sedimentación.

4.5.1.1 Prueba de Jarras

Se adaptaron 6 vasos precipitados de 1000 ml sobre el floculador mecánico y se ajustaron las paletas planas de agitación. Como sustancias coagulantes se utilizó PAC (policloruro de aluminio) y sulfato de Aluminio, variando la dosis desde 0,5 ml hasta 3 ml por litro y de 1 g a 6 g respectivamente. Para el establecimiento del tiempo al adicionar el coagulante se dejó en mezcla rápida de 100 rpm por 5 min y se bajó a la 50 rpm por 20 min para mezcla lenta y 20 min posteriormente para la sedimentación

Pasado este periodo alrededor de 10 ml de muestra fueron tomados 1 cm por debajo del nivel del sobrenadante. A estas alícuotas de lixiviados se determinaron los parámetros de turbiedad y la concentración final de carga orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno (DQO).

4.5.2 Parámetros y cronograma de monitoreo

La prueba de jarras se realizara una semana siguiente a la alimentación completa del reactor con lixiviado. Al realizar la prueba de jarras y realizado todo el proceso de floculación y sedimentación a escala laboratorio se realizara el monitoreo de los parámetros descritos anteriormente, DQO. Las determinaciones de DQO se realizaron por el método colorimétrico del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1992) con apoyo de un equipo de digestión HACH y de un espectrofotómetro. De igual manera, se determinaron las lecturas iniciales de DQO en las muestras de lixiviado, seguida de una caracterización fisicoquímica para comparar con la caracterización del afluente establecida como primer objetivo específico.

.La realización de ensayo de jarras y análisis de parámetros se realizaran de la siguiente manera:

Tabla 4 Cronograma monitoreo tto fisicoquímico

	SEMANA 1					SEMANA 2				
	L	M	MI	J	V	L	M	MI	J	V
PRUEBA DE JARRAS		X		x		x		x		x
DQO		x		X		X		X		X

Fuente: Autor

4.6 Evaluar el sistema de tratamiento de lixiviados

4.6.1 Tratamiento Biológico

Para evaluar la eficiencia del tratamiento anaerobio mediante el UASB determinaremos la concentración inicial de DQO en el sustrato usada para alimentar el reactor y la concentración final del efluente, se realizan los cálculos pertinentes según el cronograma de muestreo, para determinar el porcentaje de eficiencia del tratamiento anaerobio mediante pruebas de DQO.

4.6.2 Tratamiento Físicoquímico

Seguido de la determinación de la eficiencia del reactor UASB, procedemos a evaluar la eficiencia del tratamiento físicoquímico. Comenzaremos midiendo la DQO del efluente antes de iniciar con los ensayos de tratabilidad que sería igual al efluente del uasb y la DQO Al final del proceso de coagulación, floculación y sedimentación para generar la eficiencia de este tratamiento.

A parte de determinar las eficiencias de remoción de cada tratamiento daremos a conocer la eficiencia de todo el tren de tratamiento biológico y físicoquímico, a la entrada del UASB y a la salida del proceso de sedimentación. Utilizando la siguiente ecuación que permite cuantificar el porcentaje de eficiencia que es la siguiente.

Ecuación 4 Calculo de eficiencia del tratamiento

$$E = \left(\frac{[DQOi] - [DQOf]}{[DQOi]} \right) \cdot 100$$

Donde:

E: Eficiencia

DQOi: Concentración de DQO inicial o a la entrada

DQOf: Concentración de DQO final o a la salida

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección describiremos los resultados obtenidos en la ejecución de los objetivos específicos planteados para llevar a cabo la investigación. Se comenzara describiendo los resultados de la caracterización del lixiviado, seguido del montaje, operación y evaluación del sistema.

5.1 Caracterización del lixiviado

Se realizó la caracterización de tres muestras de lixiviado, recolectadas de forma puntual en unos de los tres tanques de almacenamiento de lixiviados del relleno sanitario la Cortada. Estos análisis Fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de control de calidad teniendo en cuenta la metodología Stándar Methods For Examinación of Wáter and Wastewater. Los

parámetros medidos en cada muestra extraída del relleno sanitario fueron: DQO, DBO₅, Solidos totales (ST), Solidos suspendidos totales (SST), Solidos suspendidos volátiles (SSV), alcalinidad, acidez, dureza, cloruros, nitritos, sulfatos, turbiedad, y pH. La recolección de la muestra y su posterior análisis se realizó en las siguientes fechas:

Tabla 5 Fechas de muestras

	RECOLECCIÓN	ANÁLISIS
MUESTRA 1	28/04/2019	29/04/2019
MUESTRA 2	12/05/2019	13/05/2019
MUESTRA 3	21/06/2019	21/06/2019

Fuente: Autor

A partir de los datos obtenidos de las tres muestras de lixiviados, realizamos la siguiente tabla donde muestra los resultados obtenidos de cada caracterización y su promedio final.

Tabla 6 Caracterización del lixiviado del relleno LA CORTADA

CARACTERIZACIÓN LIXIVIADO RELLENO SANITARIO LA CORTADA					
PARÁMETRO	UNIDAD	1	2	3	PROMEDIO
DQO	mg/L	4057	6210	5625	5297
DBO ₅	mg/L	1950	2150	1360	1516,6
DBO ₅ /DQO	---	0,48	0,35	0,24	0,36
ST	mg/L	38472	32560	47860	39630.6

SST	mg/L	3426	4872	3478	3925
SSV	mg/L	7426	10543	12642	10204
Fosfatos	mg /L PO ₄	320	710	460	360
Sulfatos	mg/L SO ₄	200	300	300	266
Nitritos	mg/L N-NO ₂	2.1	1,8	1.4	1,76
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	25000	5000	5000	11666
Dureza	mg CaCO ₃ /L	10000	20000	20000	16666
pH	---	8,76	8,8	8,3	8,62
Acidez	mg CaCO ₃ /L	10000	5000	2500	5833
Turbidez	UNT	1185	829	370	794.6
Color	UPC	22400	13600	22750	19583

Fuente: Autor

Las muestras de los lixiviados corresponden a uno de los tanques de almacenamiento del relleno sanitario, donde se mezclan los lixiviados de diferentes celdas por lo que existe una mezcla de características. Las características de los lixiviados generados en el relleno sanitario, dependerán de las características de los residuos depositados y de las condiciones reinantes en él, como temperatura, contenido de humedad, edad del relleno, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad del agua que entra en contacto con la masa de residuos dispuestos. (Luna, 2008)

Los lixiviados se pueden clasificar según la edad del relleno, joven, viejos, y medios, a continuación clasificamos el lixiviado del relleno sanitario la cortada estudiado, según la edad del relleno sanitario, según varios autores:

Tabla 7 Clasificación Lixiviado según Renou

	Nuevo	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 – 10	>10
pH	6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DQO (mg L⁻¹)	>10000	4000 – 10000	<4000
DBO₅/DQO	>0.3	0.1 – 0.3	<0.1
Compuestos Orgánicos	80% (AGV)	5 – 30% AGV + ácidos húmicos y fulvicos	Ácidos húmicos y fulvicos
Metales pesados	Bajo – Medio		Bajo
Biodegradabilidad	Importante	Medio	Bajo

Fuente: Renou, et al., 2007

Tabla 8 Clasificación lixiviado según Amokrane, Comel, & Veron

	Edad del relleno (años) y tipo de lixiviado		
	<5 (joven)	5-10 (medio)	> 10 (viejo)
Parámetro	I (biodegradable)	II (intermedio)	III (estabilizado)
pH	< 6.5	6.5-7.5	> 7.5
DQO (mg/L)	> 20,000	3,000-15,000	< 5,000
DQO/COT	< 2.7	2.0-2.7	> 2.0
DBO ₅ /DQO	> 0.5	0.1-0.5	< 0.1
AGV* (%COT)	> 70	5-30	< 5
Metales pesados (g/L)	2		< 50 mg/L

Fuente: (Amokrane, Comel, & Veron , 1997)

Según la caracterización de lixiviados de algunos autores y comparándolos con los resultados obtenidos de la caracterización realizada en la ejecución del proyecto, este sustrato se puede clasificar como **medio** ya que la DQO promedio obtenida fue de 5249 mg/L, valor que se encuentra en el rango de 3000 a 15000 y la relación DBO₅/DQO fue de

0,36, valor que se encuentra en el rango de 0.1 a 0,5, establecido por Amokrane, Comel, & Veron , 1997.

Por otra parte el pH obtenido en la investigación (8,62) corresponde a una clasificación de edad **vieja** (lixiviado estabilizado) según Ronou, 2007, por la DQO entra en la clasificación de lixiviado intermedio, y según la relación DBO5/DQO se clasifica como **nuevo**. Por lo cual se observa la combinación de características generadas en los tanques del relleno sanitario la cortada, esperándose la mezcla de lixiviados jóvenes, medios y viejos.

El pH en las tres caracterizaciones no vario en gran manera y su promedio fue de 8,62 que según Amokrane, Comel, & Veron , 1997 se clasifica como lixiviado estabilizado, viejo, o de tipo III, este lixiviado presenta baja biodegradabilidad y autores como (Aziz et al) (Nájera, Castañón, Figueroa, & Rojas-Valencia, 2009) lo catalogan como poco biodegradable con la presencia de materiales orgánicos recalcitrantes que son parcialmente estables y biológicamente resistentes. y los procesos fisicoquímicos se convierten en la mejor opción. (Aguilar). Así, para lixiviados jóvenes como primera etapa de tratamiento, siempre será recomendable pensar en sistemas biológicos.

5.2 Montaje y operación del sistema de tratamiento a escala laboratorio

5.2.1 Tratamiento biológico anaerobio (UASB)

5.2.1.1 Sistema de alimentación del reactor

El sistema de alimentación consta de un recipiente de aluminio con capacidad de 50 l, termorregulado a una temperatura de 20 °C que mantiene temperatura constante y controlada en la alimentación al reactor UASB, que se realiza mediante una bomba peristáltica sujeta a un soporte metálico que impulsa lixiviado presurizado al reactor a

través de un ducto de $\frac{1}{2}$ “, ubicada en la parte inferior del reactor manteniendo así el flujo ascendente característico de estos sistemas de tratamiento y garantizando el contacto con el manto de lodos. En este tanque de aluminio se le adapta la bomba peristaltica el cual consta de un filtro que se encuentra adentro del recipiente succionando el lixiviado mediante una manguera hasta la entada del reactor uasb. El efluente ya tratado sale por la parte superior por un orificio con diámetro de 10mm después de atravesar el separador de tres fases (SGL).

Ilustración 9 Sistema de Alimentación

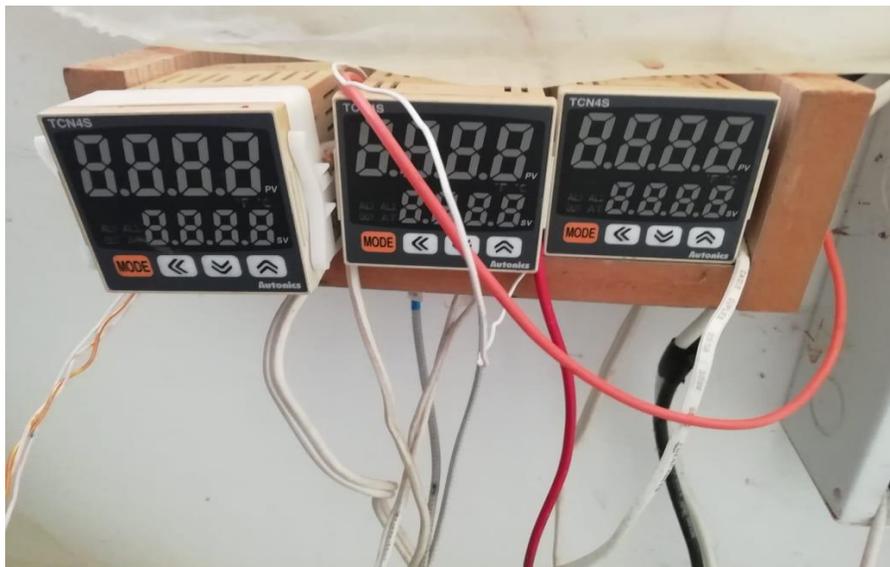


Fuente: Autor

5.2.1.2 Sistema controlador de temperatura

Es importante tener la temperatura constante en todo el proceso, y por eso se hace uso del sistema controlador de temperatura, del cual dispone cada tanque de almacenamiento en el laboratorio GIIAS. Este montaje tiene la función de proporcionar la temperatura por medio de la resistencia al tanque de aluminio que alimenta el UASB y por tanto suministra la temperatura a todo el montaje anaerobio. Este sistema se programó para encenderse cuando la temperatura baje, y apagarse cuando este se encuentre calibrada en la temperatura elegida.

Ilustración 10 Controlador de temperatura



Fuente: Autor

5.2.2 Revisión de diseño y adecuación del reactor UASB

Para la adecuación del reactor UASB a escala laboratorio que está construido en su cuerpo central con diámetro 6 pulgadas de tubo acrílico transparente, una altura útil de 2,20 metros que determina un volumen de 40 l, se tuvieron en cuenta las sugerencias dadas por (Romero Rojas, 2000); quien también estableció que la operación de esta unidad se rige por los parámetros y los valores indicados en las tablas .

Tabla 9 Parámetros de diseño UASB

PARAMETRO	VALOR
DQO del afluente	5000 - 15000 mg/L
Temperatura del afluente	> 15 °C
Tiempo de retención H.	4 - 12 h
carga orgánica	0,5 - 40 KG DQO/ m3dia
velocidad ascensional	1 – 2 m/h
profundidad del digestor	< 4,5 m
profundidad del sedimentador	< 1,5 m
profundidad del reactor	< 6 m
volumen del reactor	<1500 m3
Eficiencia en la remoción de DQO	60% - 90%

Fuente: Romero rojas,2000

Tabla 10 TRH según temperatura

Temperatura	Tiempo de retención hidráulica
16 °C - 19 °C	10 - 14 horas
20 °C - 26° C	7- 9 Horas
> 26 ° C	> 6 horas

Fuente: Romero rojas,2000

Teniendo en cuenta los datos de las tablas 7 y 8 se calcularon los parámetros para la operación del reactor UASB escogiendo como temperatura de operación 20° C por ende un

tiempo de retención hidráulica (TRH) de 9 horas, y de acuerdo al volumen del UASB existente con lleva a establecer un caudal (Q) de operación de 74 ml/min:

Según lo anterior, se confirmó que el reactor UASB utilizado en esta investigación cumple con los parámetros y recomendaciones de diseño establecidas por los diferentes autores referenciados anteriormente. A continuación, se presenta en la ilustración 12 el plano del reactor.

Caudal de operación:

$$Q = V/TRH$$

Donde el volumen total del reactor es 40 L:

$$Q = \frac{40 \text{ l} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}}}{9 \text{ hr} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}}}$$

$$Q = 74 \text{ ml/min}$$

Carga organica Volumetrica:

$$COV = \frac{Q * [C]}{V}$$

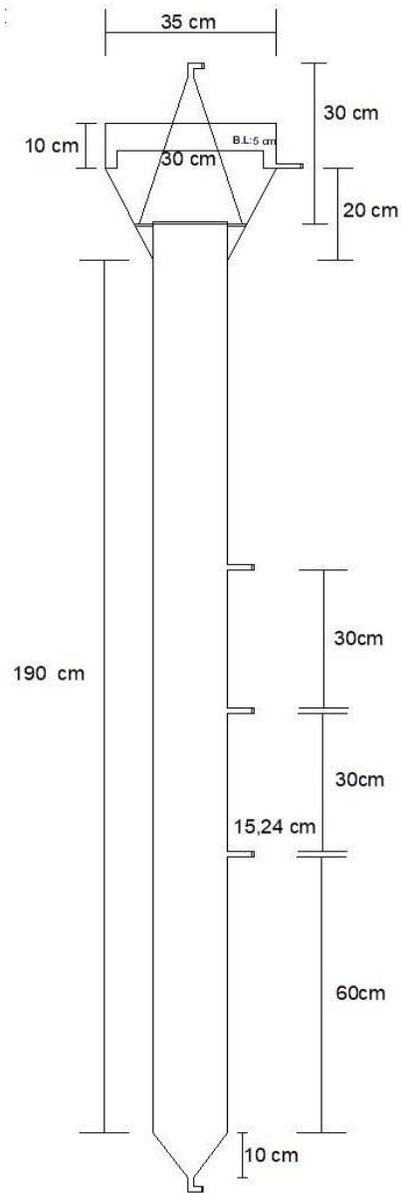
$$Q = 0.10656 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q = \frac{0,10656 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} * [6 \text{ kg DQO}/\text{m}^3]}{0,04 \text{ m}^3}$$

$$COV = 16 \text{ kg}/\text{m}^3 (0,5 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ dia} < 16 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ dia} < 40 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ dias})$$

Cumple. Ok

Ilustración 11 Diseño UASB laboratorio



Fuente: Peña,2017

5.2.3 Operación del reactor UASB a escala de laboratorio

5.2.3.1 Arranque y bioadaptación del reactor UASB

Con la finalidad de obtener las condiciones anaeróbicas dentro del reactor UASB, el arranque del mismo se inició mediante la inoculación con estiércol de cerdo, debido a su gran cantidad y variedad microbiana. Se utilizaron 5 kilogramos de excretas frescas de cerdo, las cuales se diluyeron en 10 litros de agua potable, solución que se filtró en un colador; se introdujo un volumen de la mezcla equivalente al 25% de la capacidad total del reactor UASB y se completó el volumen con agua residual del municipio de Pamplona que se recirculó durante un periodo de tres días para formar la biomasa suspendida. Para la fase de aclimatación el sustrato se preparó diariamente un volumen constante de 40 l de una mezcla de agua residual doméstica y lixiviado, que se alimentó con un caudal de 74ml/min. El primer día se recirculó solo agua residual doméstica. En los días siguientes la mezcla disminuyó en un 10% diariamente el volumen de agua residual doméstica, mientras que el volumen del lixiviado se incrementaba en el mismo porcentaje hasta recircular solo lixiviados diluidos. En la tabla 9 se presentan los volúmenes diarios utilizados en la preparación de la mezcla necesario en el proceso de aclimatación.

Volumen de mezcla agua residual y lixiviado

VOLUMEN DE LA MEZCLA (L)	DÍA	VOLUMEN	
		AGUA RESIDUAL (L)	LIXIVIADO (L)
40	1	40	0
40	2	36	4
40	3	32	8
40	4	28	12
40	5	24	16
40	6	20	20
40	7	16	24
40	8	12	28
40	9	8	32
40	10	4	36
40	11	0	40

Fuente: Autor

5.2.3.2 Preparación del sustrato de alimentación

Para la alimentación del reactor UASB se trabajó con una concentración de 6000 mgDQO/L para la carga orgánica volumétrica establecida, debido a la variabilidad en la concentración de DQO que presenta los lixiviados procedentes del relleno sanitario, la preparación del sustrato de alimentación se realizó por medio de diluciones como se evidencia en el siguiente ejemplo.

5.3 DISEÑO FLOCULADOR TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO

Floculador hidráulico de tabiques de flujo vertical

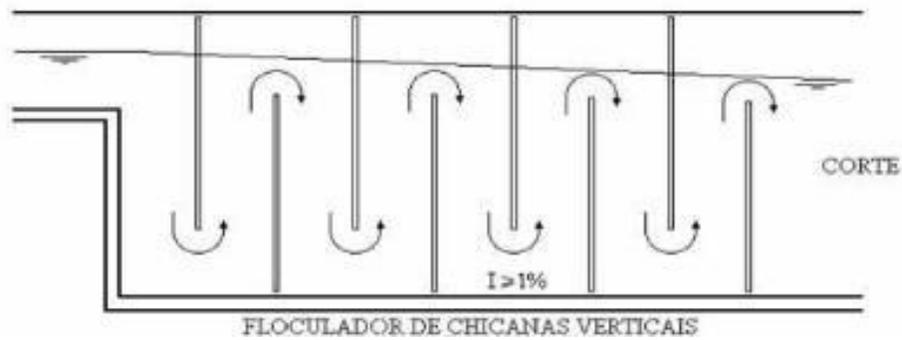


Tabla 11 Datos iniciales floculador

DATOS INICIALES DEL FLOCULADOR		
Caudal de diseño	0.10656	m ³ /día
	1,23x10 ⁻³	m ³ /s
velocidad	0,2	m/s
TRH	29 hr	hr
Espesor placas	7	mm
Ancho floculador	31	cm
Largo floculador	62	cm

Fuente: Autor

Geometría floculador

Tabla 12 Calculo dimensiones floculador

CALCULOS		
Volumen del tanque	130	L
Longitud del recorrido		hr

Espesor del canal	7	mm
Longitud de canal	2.5	m
Longitud del floculador	62	cm

Fuente: Autor

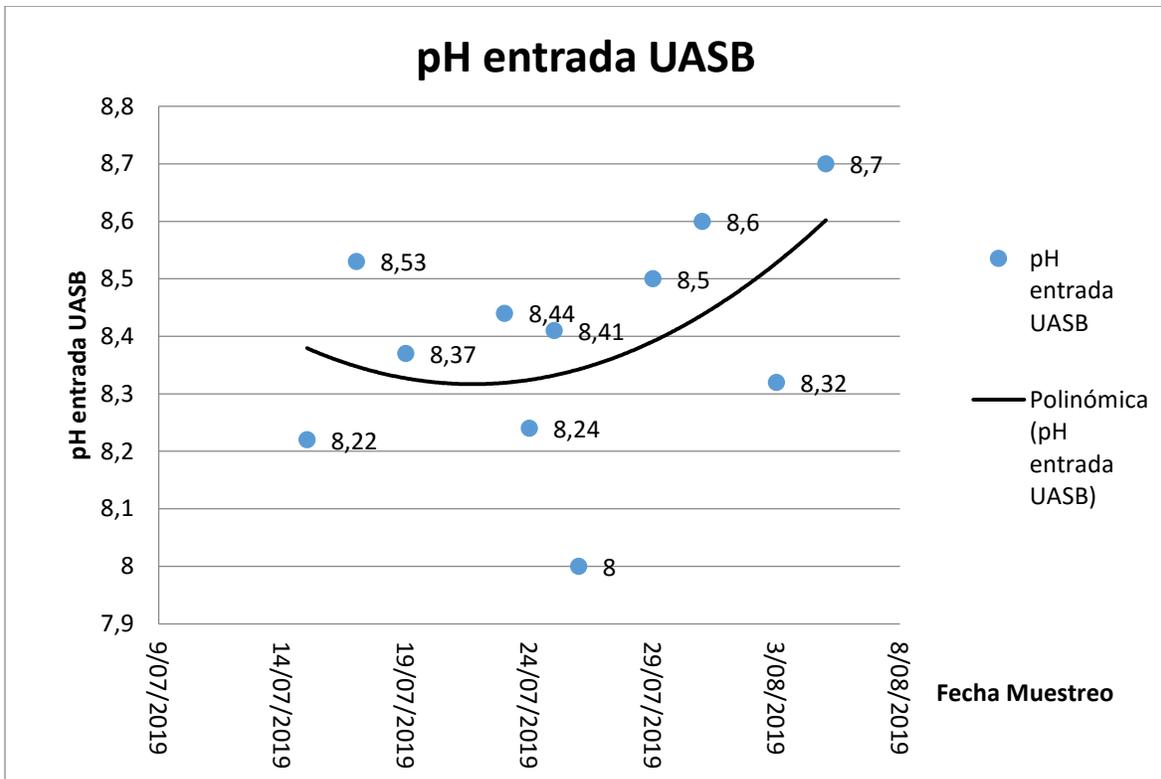
5.4 Evaluación del sistema de tratamiento propuesto

Para evaluar el tren de tratamiento propuesto en el proyecto, se ilustraran los datos obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio por medio de gráficas, Donde observaremos el comportamiento de los parámetros estudiados en el monitoreo del reactor UASB y el tratamiento fisicoquímico.

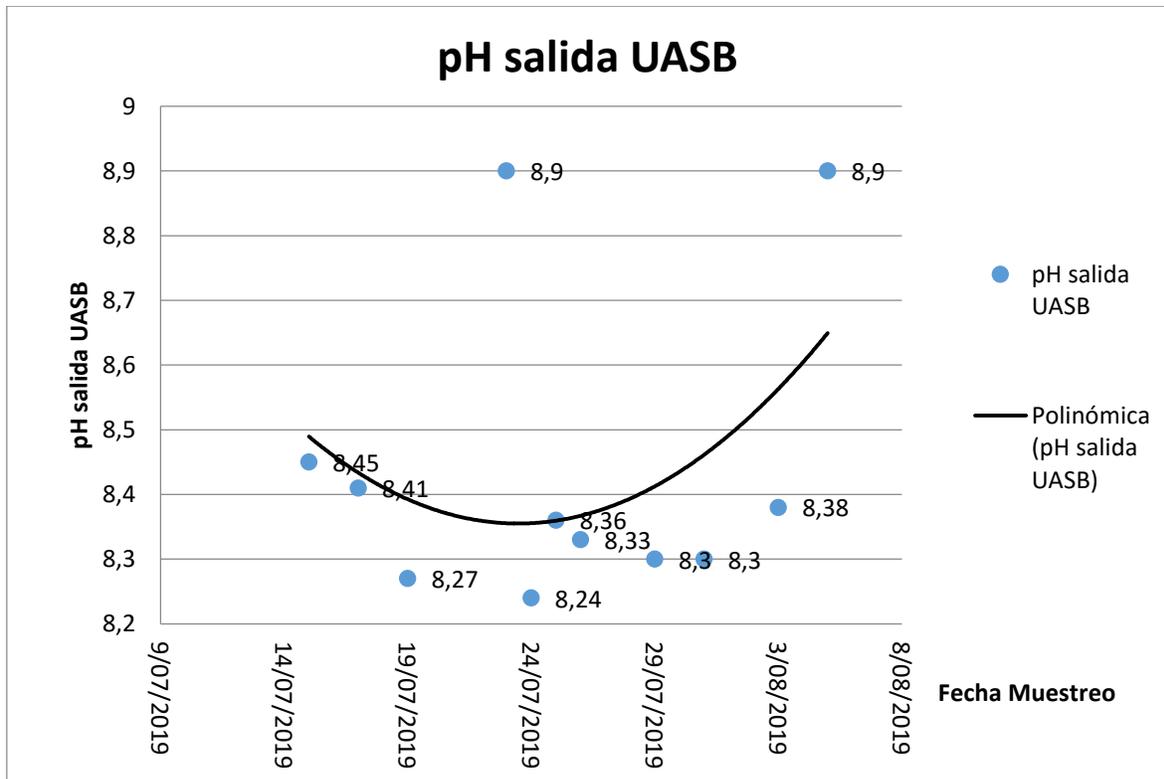
5.4.1 Tratamiento biológico anaerobio reactor UASB

5.4.1.1 Comportamiento pH a la entrada del reactor UASB

Grafica 1 pH Entrada reactor UASB



Grafica 2 pH salida UASB



El pH del lixiviado en la entrada del sistema se encontró en un rango de 8,0 a 8,7 y a la salida osciló de 8,24 a 8,9, con promedios de 8,38 y 8,46 valores cercanos al obtenido en la caracterización inicial del lixiviado del relleno sanitario la cortada, en la cual se obtuvo un valor de 8,62 para el lixiviado recolectado, por lo que se evidencia que el sistema de tratamiento biológico anaerobio empleado no afecta de manera significativa el pH del lixiviado tratado tanto en la entrada como en la salida.

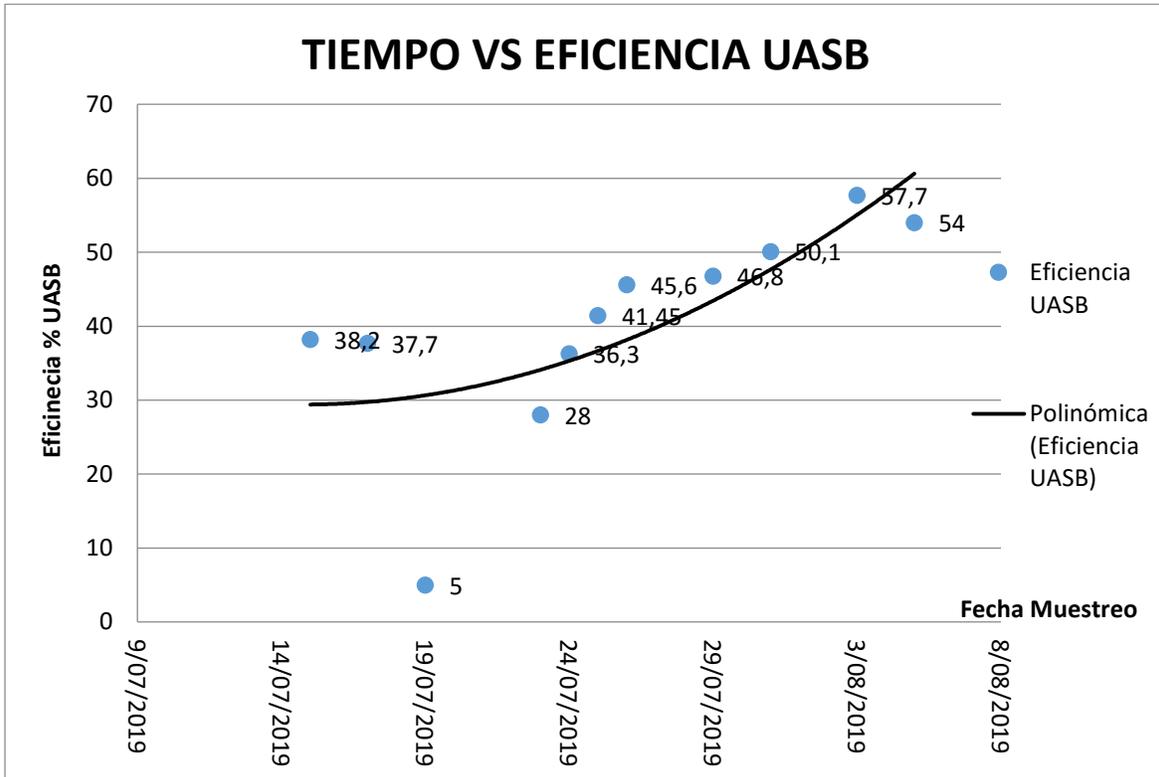
5.4.1.2 Comportamiento del reactor UASB en términos de eficiencia

A continuación, se presentan y se detallan los resultados de eficiencia obtenidos en el sistema anaerobio, los cuales se determinaron de manera experimental evaluando la diferencia de DQO entre la entrada y la salida desde la alimentación completa del reactor con lixiviado.

UASB			
Fecha Muestreo	ENTRADA	SALIDA	EFICIENCIA%
15/07/2019	5440	3360	38,2
17/07/2019	5440	3390	37,7
19/07/2019	5440	5168	5
23/07/2019	5390	3880	28
24/07/2019	6940	4420	36,3
25/07/2019	5670	3320	41,45
26/07/2019	6140	3340	45,6
29/07/2019	6056	3220	46,8
31/07/2019	5040	2514	50,1
02/08/2019	5040	2314	54
05/08/2019	6123	2278	57,7

Los datos observados anteriormente se reflejan en la gráfica 2 en donde la primera semana de observación luego de alimentar solo con lixiviado, muestra un comportamiento de disminución de eficiencia, disminuyendo la eficiencia de remoción de carga a 5%. Momento donde se buscaron soluciones pertinentes para el aumento y la estabilización del reactor.

Grafica 3 Tiempo vs Eficiencia



La grafica 2 de remoción de carga con respecto al tiempo, en donde en el comportamiento de la curva se ve una variación pasando de un crecimiento exponencial a logarítmico, seguramente se debe al cambio de sustratos y su gran diferencia de carga aplicada.

Como se observa en las gráficas 2 las eficiencias de remoción de DQO del sistema tuvo un máximo de 57,7%, observando el comportamiento de la polinómica se describe un aumento significativo de la eficiencia a medida que el tiempo incrementa. Sin embargo en la primera semana se observó una disminución drástica en la eficiencia, resultado que nos lleva a observar que el sustrato utilizado se encontraba en mal estado, obteniendo una concentración de materia organica de 4000 mg/L lo cual desestabilizo el reactor

Culminando con la tercera semana de monitoreo se observa que persiste el crecimiento porcentual de remoción en materia orgánica como se presenta en la tabla 16, en función de la temperatura en este caso de 20°C, de igual forma se incremento la temperatura con respecto a la segunda semana de monitoreo en 2°C ya que a la salida del reactor la temperatura era menor a la establecida, se sigue manifestando un comportamiento creciente el cual es muy satisfactorio para las expectativas de la investigación, y se hace más notoria la intención de crecimiento poblacional logarítmica, cerrando dicha semana con valores cercanos al 57,7% de remoción.

Por último, se puede apreciar en la gráfica 3, todo el recorrido evolutivo del reactor en términos de remoción de carga desde el día cero hasta el día 05 de agosto de 2019, donde sí se detalla cuidadosamente la línea de tendencia de la gráfica se observa un crecimiento exponencial, el cual indica que la curva de remoción en función del tiempo seguirá en aumento conforme continúe avanzando hasta conseguir la estabilización de la población de microorganismo. Por ende, se cree que pueda llegar fácilmente a un valor porcentual de remoción de materia superior al 65% e incluso cercanos al 75%, según como se observó la evolución del mismo reactor durante estas semanas de estudio, lo cual da respuesta a la incógnita de si es viable llevarlo a una escala real ya que el sistema con tan solo 3 semanas de monitorio y casi 4 semanas de adaptación ya evidencia valores cercanos al 60% partiendo del hecho que estos sistemas anaerobios logran su estabilización y rendimiento máximo entre las 12 y 16 semanas de funcionamiento.

lo que corrobora que este sistema de tratamiento presenta mejor comportamiento con cargas orgánicas altas como lo menciona (Romero Rojas, 2000), además de eso se evidencio que al sufrir un cambio de la concentración de DQO en la alimentación, la eficiencia del

sistema decae considerablemente por un breve periodo de tiempo en el que los microorganismos logran adaptarse a dicha concentración.

5.4.2 Tratamiento Físicoquímico

Para el tratamiento físicoquímico utilizamos dos tipos de coagulante PAC y sulfato de aluminio donde por medio de prueba de jarras determinamos la dosis óptima que presentara mayor remoción de materia orgánica después dosificar en el mezclador rápido y hacer a los lixiviados el proceso físicoquímico conformado por los procesos coagulación, floculación y sedimentación

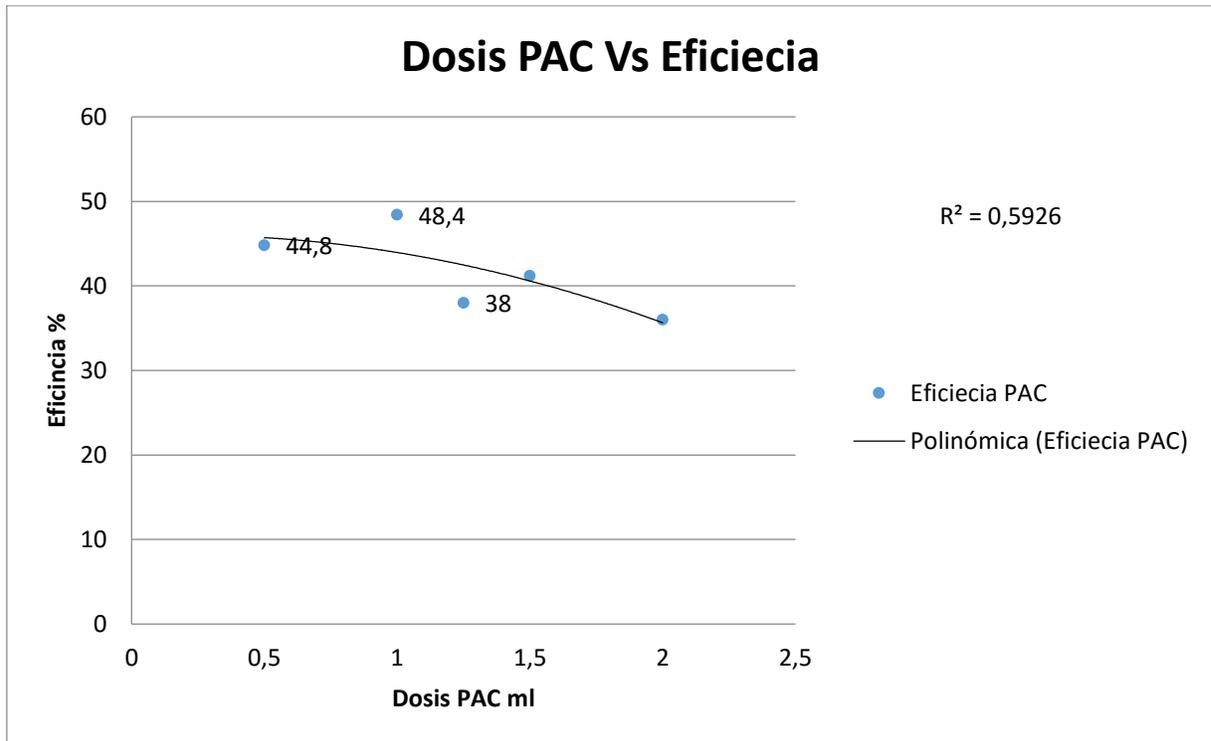
5.4.2.1 Determinación de dosis óptima

El primer ensayo físicoquímico se realizó con el coagulante PAC seguido del sulfato de aluminio. La distribución de las dosis de cada coagulante se realizó de manera volumétrica, donde la dosis para PAC fue de 0,5, 1, 1,25, 1,5 y 2 ml/L ya que este es líquido. Para sulfato de aluminio siendo este el comercial y sólido se pesaron distribuyéndose 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 mg/L en el segundo ensayo. A continuación describimos los resultados obtenidos de cada tratamiento especificando el coagulante y la dosis utilizada.

5.4.2.1.1 Coagulante PAC

Tabla 13 Coagulante PAC

EFLUENTE UASB			
Dosis ml/L	Entrada	Salida	Eficiencia%
0,5	3340	1843	44,8
1	3340	1723	48,4
1,25	3340	2070	38
1,5	3340	1964	41,2

Grafica 4 Eficiencia PAC

Fue analizada la eliminación de DQO a cinco diferentes dosis de coagulante. Los resultados muestran que a menor cantidad de coagulante la concentración de DQO es mayor, evidenciando que a mayor cantidad de coagulante los floculos aunque se observan para grandes sedimentan más lento que los flocs de las dosis bajas.

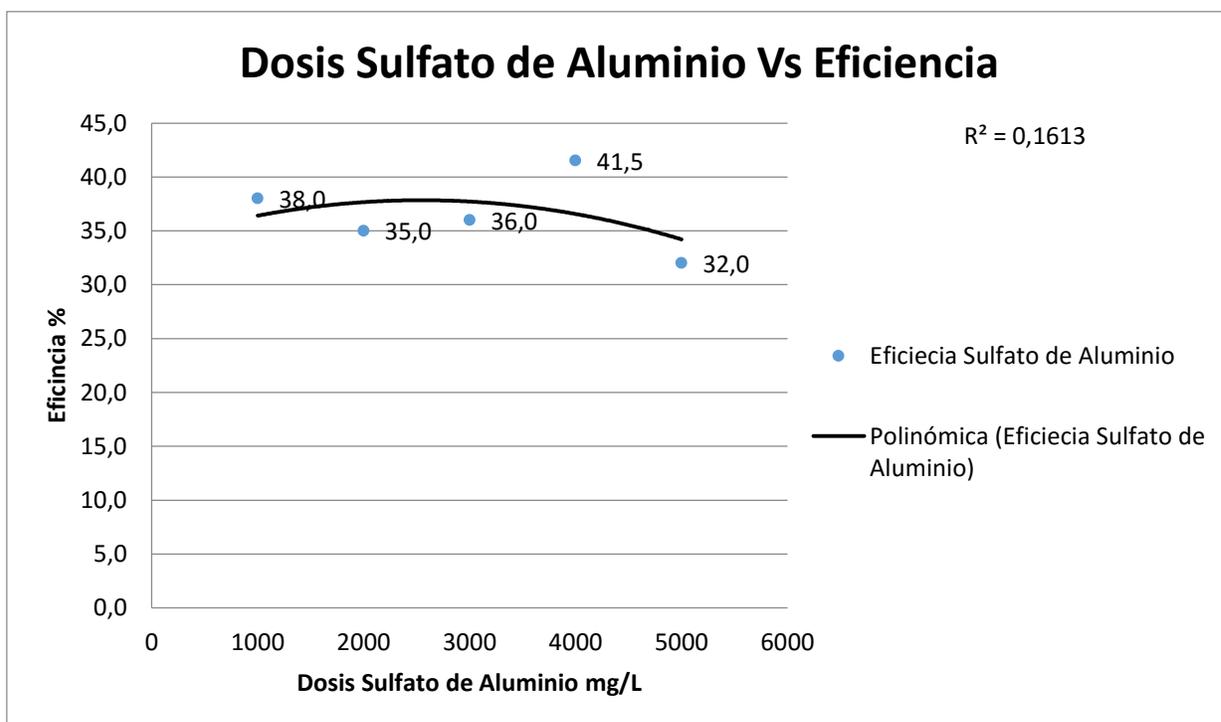
Como se observa en la gráfica la dosis que mayor remoción de eficiencia obtuvo fue la Dosis de 1 ml arrojando un resultado de remoción del 48,4%.

5.4.2.1.2 Coagulante Sulfato de Aluminio

EFLUENTE UASB			
Dosis mg/L	Entrada	Salida	Eficiencia%
1000	2514	1558	38,0
2000	2514	1634	35,0
3000	2514	1609	36,0
4000	2514	1470	41,5
5000	2514	1709	32,0
6000	2514	1156	54,0

Fuente: Autor

Grafica 5 Dosis Sulfato de Aluminio vs Eficiencia



Para este ensayo los resultados muestran que a mayor cantidad de coagulante la concentración de materia orgánica disminuye, observando que a una dosis de 4000 mg/L la

remoción de materia orgánica es de 41,5% y a una dosis menor de 1000 y 2000 la remoción es de 38% y 35% respectivamente.

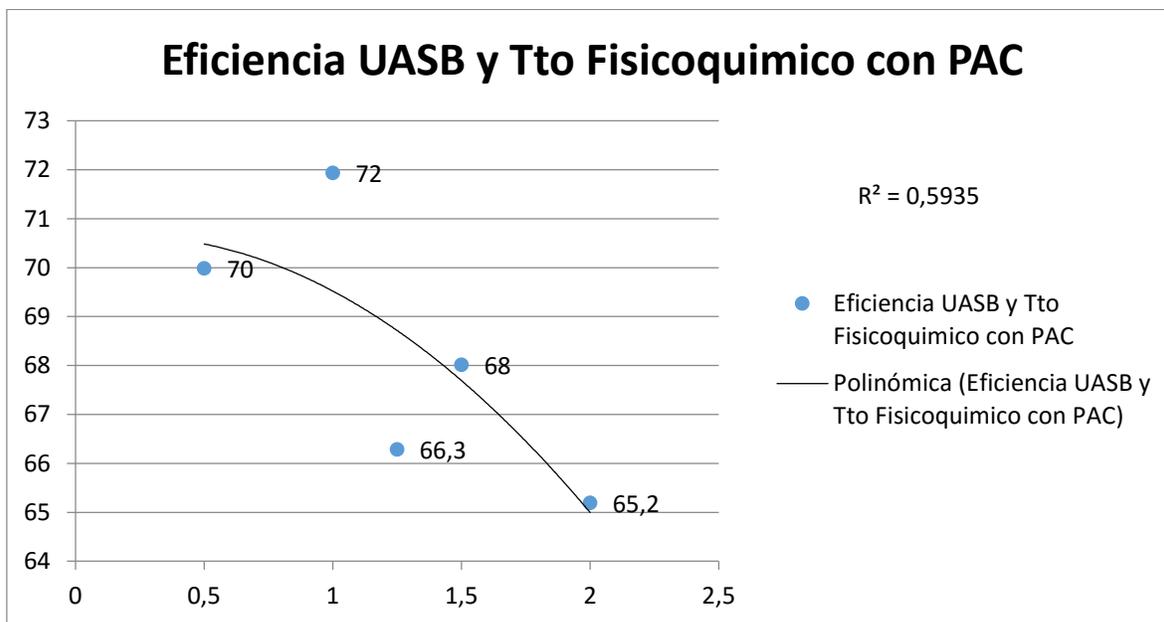
5.4.3 Eficiencia tren de tratamiento anaerobio y fisicoquímico PAC

Tabla 14 Eficiencia UASB y PAC

DOSIS PAC ml/L	Entrada UASB	Salida Tto Fisicoquímico	Eficiencia%
0,5	6140	1843	70
1	6140	1723	72
1,25	6140	2070	66,3
1,5	6140	1964	68
2	6140	2137	65,2

Fuente: Autor

Grafica 6 Eficiencia UASB y PAC



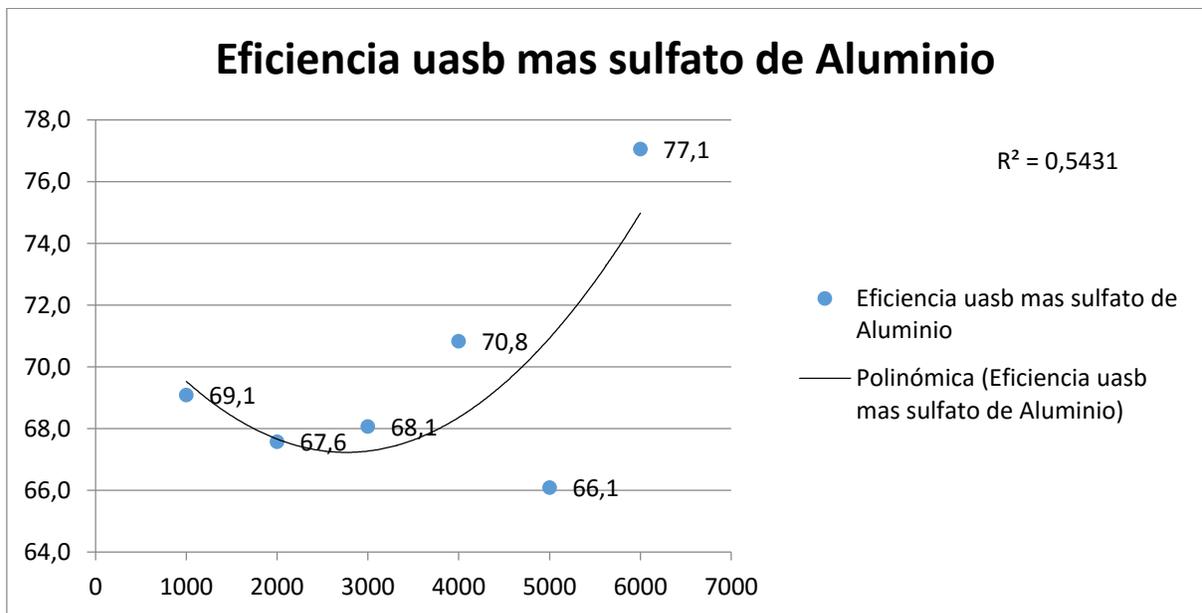
En la gráfica se puede observar que la mayor eficiencia la genera la dosis de 1 ml siendo el 72% una remoción alta cumpliendo con todas las expectativas del proyecto

5.4.4 Eficiencia tren de tratamiento anaerobio y fisicoquímico Sulfato de Aluminio

DOSIS mg/L	Entrada UASB	Salida Tto Fisicoquimico	Eficiencia%
1000	5040	1558	69,1
2000	5040	1634	67,6
3000	5040	1609	68,1
4000	5040	1470	70,8
5000	5040	1709	66,1
6000	5040	1156	77,1

Fuente: Autor

Grafica 7 Eficiencia UASB y Sulfato de Aluminio



Como se evidencia en la gráfica con una dosis de 6000 mg/L se obtiene una remoción de materia orgánica de 77,1%. Observando que la combinación de estos procesos tanto

anaerobio como fisicoquímicos remueven hasta el 80% de materia orgánica siendo un tratamiento viable en el tratamiento de lixiviado del relleno sanitario la cortada.

6 CONCLUSIONES

- El lixiviado generado en el relleno sanitario la cortada de Pamplona, presenta gran inestabilidad en el tiempo, generando concentraciones de materia orgánica muy variadas; esto es debido a que físicamente el sistema mezcla el lixiviado generado en cada una de las celdas de operación del relleno, siendo esta la razón de que experimentalmente nos encontramos con la diferencia de clasificación en edad del sustrato según el parámetro analizado.
- Con los resultados obtenidos en esta investigación se confirma que el reactor de manto de lodos de flujo ascendente (UASB) puede soportar y operar de manera eficiente con cargas orgánicas elevadas ya que presento eficiencias hasta del 50 % para una COV de 16 kg/m³ día, lo que evidencia que este sistema es una gran alternativa para el tratamiento de lixiviados.
- Durante el tiempo de operación del reactor UASB se evidencio que la variación del pH es muy baja entre la entrada y la salida del sistema se registraron tanto en el afluente como en el efluente del rector, con valores ligeramente alcalinos que según Contreras y Suarez en 2006, el lixiviado puede poseer un alto contenido de nitrógeno amoniacal, y como consecuencia de un aumento de pH, se puede alcanzar concentraciones inhibitorias de amoníaco libre

- En el monitoreo realizado al sistema se observó que el reactor UASB es fácilmente adaptable a incremento de carga orgánica volumétrica, el cambio de carga genera una baja inestabilidad en el sistema por un breve periodo de tiempo en el que los microorganismos se adaptan nuevamente.
- Se pudo concluir que el tratamiento propuesto anaerobio y fisicoquímico tiene un alto potencial de viabilidad como nueva alternativa de tratamiento e innovación en los manejos de desechos líquidos provenientes del relleno sanitario la cortada, el cual puede remover casi el 80% de carga orgánica aplicada con tan solo dos coagulantes utilizados y sin aun lograr punto de estabilización y eficiencias máximas en el reactor UASB.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir investigando los procesos de tratamiento de lixiviados utilizando los Reactores UASB, para determinar con exactitud la temperatura incidente en el proceso de biodegradación, aparte tener en cuenta el estudio de suelo y del sistema de recolección - almacenamiento, con el fin de comprobar las causas del rango de alcalinidad que presenta el lixiviado.
- Un parámetro importante es el tiempo de retención hidráulico donde es conveniente estudiar otros TRH y comparar eficiencias con cada uno de ellos.
- Adicional a la determinación de la eficiencia de remoción de DQO, un factor determinante es el seguimiento al biogás producido, por lo que es recomendable

acoplar al sistema un dispositivo de control para cuantificarlo y realizar un posterior análisis.

- Tener en cuenta para el seguimiento y estudio de otros parámetros de monitoreo como los ST, SSV, SST, DBO5, alcalinidad, acidez, dureza y metales que permitan mejorar la evaluación del sistema.

8. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, M. Y., Doménech-López, D. F., & Eng-Sánchez, D. F. (ABRIL de 2015). *Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB*. Obtenido de Tecnología Química:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852015000100003

Aguilar, H. A. (s.f.). Obtenido de

https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta4/Lixiviados.pdf

Alcaldía de Pamplona. (s.f.). Obtenido de [http://pamplona-](http://pamplona-nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx)

[nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx](http://pamplona-nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx)

Arango, M. J. (26 de febrero de 2018). *MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN MEJÍA -PICHINCHA--ECUADOR*.

Obtenido de Repositorio de la Universidad Internacional SEK Ecuador:

<http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2882/5/TESIS%20ANRANGO%20PAVON%20MARIA%20JOSE.pdf>

Bermúdez, R. C., Rodríguez, S., Martínez, M. d., & Terry, A. I. (s.f.). *Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogas*.

Obtenido de

https://www.researchgate.net/profile/Adis_Terry/publication/267241848_Ventajas_del_empleo_de_reactores_UASB_en_el_tratamiento_de_residuales_liquidos_para_la_obtencio

n_de_biogas/links/553d9f3d0cf2c415bb0f7472/Ventajas-del-empleo-de-reactores-UASB-en-el-tra

Cárdenas, Y. A. (ABRIL de 2000). *TRATAMIENTO DE AGUA: COAGULACION Y FLOCULACION*.

Obtenido de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154

CARO, R. R. (2017). *REACTORES UASB EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*.

Obtenido de

http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3tSoAKOQjVsJ:aula.aguapedia.org/pluginfile.php/16135/mod_folder/content/0/REACTORES%2520UASB%2520PTAR.docx%3Fforcedownload%3D1+%&cd=11&hl=es&ct=clnk&gl=co

Chávez, A. M. (Octubre de 2013). *Tratamiento Fisicoquímico y Biológico de lixiviado del Relleno*.

Obtenido de

<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/127/1/Tesis%20Ana%20Maria%20Valles%20Ch%C3%A1vez.pdf>

Contreras, A., & Suárez, J. (24 de Agosto de 2006). *Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal" de la ciudad San José de Cúcuta*. Obtenido de

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/2794>

DAVALOS, J. (2018). Obtenido de

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8632/1/96T00434.pdf>

Giraldo. (2001).

Giraldo. (2001). *Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes*. Obtenido de

Revista de Ingenieria:

<https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/download/538/718>

Irigoín, S., & Zaldivar, J. (2016). *Clarificación fisicoquímica de lixiviados mediante procesos de coagulación, floculación y sedimentación del botadero municipal de la provincia de*

Moyobamba. Obtenido de <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2602>

Jiménez Cerón, Y., & Calvache, D. (DICIEMBRE de 2018). *TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS*

UTILIZANDO. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Lara-](https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Lara-Borrero/publication/328521923_Tratamiento_de_lixiviados_utilizando_humedales_construidos_y_determinacion_de_conductividades_hidraulicas_en_clima_tropical/links/5bf80ee9299bf1a0202dcb60/Tratamiento-de-lixivias)

[Borrero/publication/328521923_Tratamiento_de_lixiviados_utilizando_humedales_construidos_y_determinacion_de_conductividades_hidraulicas_en_clima_tropical/links/5bf80ee9299bf1a0202dcb60/Tratamiento-de-lixivias](https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Lara-Borrero/publication/328521923_Tratamiento_de_lixiviados_utilizando_humedales_construidos_y_determinacion_de_conductividades_hidraulicas_en_clima_tropical/links/5bf80ee9299bf1a0202dcb60/Tratamiento-de-lixivias)

Larrota, L. S., García, L. U., Torres, L. G., & Mejía, C. Z. (5 de Diciembre de 2018). *Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales*

municipales. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/70332>

Leon, F. C., & Fajardo, E. F. (2005). *ESTUDIO DE LOS REACTORES UASB PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL*. Obtenido de

<http://www.bdigital.unal.edu.co/1980/1/fernandacristinamorilloleon.2005.pdf>

Lorenzo, Y., & Obaya, M. C. (2006). *LA DIGESTION ANAEROBIA Y LOS REACTORES UASB*. Obtenido

de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>

Lozada, P. T., Rodríguez, J. A., Barba, L. E., Morán, A., & Narváez, J. (24 de Agosto de 2006).

Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB. Obtenido de

<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/2405/1563>

Luna, M. D. (2008). *SISTEMAS DE TRATAMIENTOS PARA LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS*

SANITARIOS. Obtenido de

<https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/304/2/628.44564C797.pdf>

Martinez-Lopez, A. (24 de abril de 2014). *Alternativas actuales del manejo de lixiviados*. Obtenido

de Avances en Química: <http://www.redalyc.org/pdf/933/93330767005.pdf>

MONTEZUMA, D. (2019). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS*

GENERADOS EN EL BOTADERO DEL CANTÓN. Obtenido de

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/10577/1/236T0421.pdf>

Nájera, H., Castañón, J., Figueroa, J., & Rojas-Valencia, M. (2009). Obtenido de

https://www.researchgate.net/profile/Hugo_Najera-

[Aguilar/publication/320411131_CHARACTERIZACION_Y_TRATAMIENTO_FISICOQUIMICO_D](https://www.researchgate.net/publication/320411131_CHARACTERIZACION_Y_TRATAMIENTO_FISICOQUIMICO_D)

[E_LIXIVIADOS_MADUROS_PRODUCIDOS_EN_EL_SITIO_DE_DISPOSICION_FINAL_DE_TUXT](https://www.researchgate.net/publication/320411131_CHARACTERIZACION_Y_TRATAMIENTO_FISICOQUIMICO_D)

[LA_GUTIERREZ_CHIAPAS_MEXICO/links/59e3d1ab458515393d5b95a2/](https://www.researchgate.net/publication/320411131_CHARACTERIZACION_Y_TRATAMIENTO_FISICOQUIMICO_D)

Novelo, R. I. (2004). *TRATAMIENTO FISICOQUÍMICO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO*.

Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/novelo.pdf>

NOVELO, R. I., BORGES, E. R., RIANCHO, M. R., FRANCO, C. A., VALLEJOS, G. G., & CISNEROS, y. B.

(2009). *Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados*. Obtenido de

SciELO: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-

[49992009000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-)

Novelo, R. M. (2004). *Ingeniería Revista Académica*. Obtenido de Tratamiento fisicoquímico de los

lixiviados de un relleno sanitario.

Novelo, R. M., Borges, E. C., & Riancho, M. R. (2004). Obtenido de Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno sanitario: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46780213.pdf>

Pacco, A., Vela, R., & Miglio, R. (Sep de 2018). *Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000300009

Patricia, T., Jenny, R., Luz, B., Adriana, M., & Jorge, N. (24 de Agosto de 2006). *Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB*. Obtenido de <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/2405/1563>

PEÑA, Y. A. (2017). *TRATAMIENTO DE LIXIVADO DEL RELLENO SANITARIO LA CORTADA DE PAMPLONA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE UN REACTOR UASB A ESCALA LABORATORIO*. Pamplona.

Pinilla, A. N., & Martinez, Y. D. (2013). *TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA UNIVERSIDAD LIBRE SEDE BOSQUE POPULAR POR MEDIO DEL SISTEMA DE REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE UASB A ESCALA PILOTO*. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11326/TRATAMIENTO%20BIOL%C3%93GICO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20GENERADAS%20EN%20LA%20UNIVERSIDAD%20LIBRE%20SEDE%20BOSQUE%20POPULAR%20P.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

RODRÍGUEZ, J. A. (s.f.). *TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES*. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>

Rodriguez, S. (s.f.). *RESIDUOS SOLIDOS EN COLOMBIA: SU MANEJO ES UN COMPROMISO DE TODOS*. Obtenido de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:1oK0eeV->

rzQJ:revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/download/117/92+&cd=3&hl
=es&ct=clnk&gl=co

SANCHEZ, A. M., & LIZCANO, G. A. (2013). *EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA DESCARGA DE LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA EN EL RIO TUNJUELO*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11129/MadrigalSanchezAnaMaria2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sedimentacion. (s.f.). Obtenido de Material Docente Multimedia en las Áreas de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente:

<http://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/index.html>

SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES. (s.f.). Obtenido de FICHA TECNICA:

https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf

Torres Lozada, P., & Rodríguez. (18 de Diciembre de 2005). *Tratamiento anaerobio de lixiviados en reactores UASB*. Obtenido de Ingeniería y Desarrollo:

<http://www.redalyc.org/pdf/852/85201804.pdf>