

**EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE DEGRADACION DE MATERIA  
ORGANICA EN REACTORES DE FILTRO ANAEROBIO TRIFASICO (TRI-FAFS) Y  
DE LA CINETICA DE REACCION.**

**VIVIANA KATHERINE MERCEDES ROZO BARRERA**

**1.094.280.554**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**PAMPLONA, 2019**

**EVALUACION DEL RENDIMIENTO DE DEGRADACION DE MATERIA  
ORGANICA EN REACTORES DE FILTRO ANAEROBIO TRIFASICO (TRI-FAFS) Y  
DE LA CINETICA DE REACCION.**

**VIVIANA KATHERINE MERCEDES ROZO BARRERA  
1.094.280.554**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERA AMBIENTAL**

**Director: JULIO ISAAC MALDONADO M.**  
M.Sc. en Ingeniería Ambiental  
[jimaldonadom@hotmail.com](mailto:jimaldonadom@hotmail.com)

**Codirector: ANGELA MARITZA CAJIAO**  
Microbióloga  
[angelacajiaoster@gmail.com](mailto:angelacajiaoster@gmail.com)

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 2019

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado 1

---

Jurado 2

## ***Dedicatoria***

*“Dios no pone en tu camino obstáculos que no puedas superar”*

Dedicado inicialmente al padre divino de todo lo creado que me permite estar aprendiendo en este plano tierra.

A mi madre Patricia Barrera, pues sin ella nada de esto sería posible, el triunfo es de ella y para ella, también a mi padre Jesús Antonio Rozo que se encuentra en el cielo.

A mis hermanos Mayra y Jesús Rozo, y mi fiel y amorosa compañía, mi mascota y parte de nuestra familia Kira.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Como en todo lo que hacemos diariamente el principal agradecimiento es para Dios, quien me permite estar y vivir nuevas experiencias día a día en este plano tierra y que sin el nada de esto sería posible.*

*A mi madre quien es la mujer más fuerte que conozco y que siempre ha pesar de las adversidades que se nos presenten está conmigo para apoyarme y darme ánimos para lograr mis metas. A mi padre que está en el cielo y mis hermanos quienes han aportado en mi aprendizaje y crecimiento personal, espiritual y profesional.*

*A Jairo Brito por darme su compañía, apoyo y ser mi compañero de vida y aprendizaje. Un agradecimiento especial para mis tutores de trabajo de grado, Julio Isaac Maldonado y Angela Cajiao, quienes con mucho amor y paciencia me han brindado su sabiduría y tiempo, para llevar a cabo todo este proceso.*

*A todos mis docentes de quienes he obtenido mucho conocimiento para mi vida a partir de ahora que salgo a el campo laboral.*

*Al grupo de investigación del semillero SIMBIO, encabezado por Milena Pabón y Erika Sánchez, por su participación activa e instrucción en la ejecución de las actividades de identificación microbiológicas planteadas en este estudio. Agradezco también al Ingeniero Carlos Vides, al docente Jorge Luis Carrillo, al personal del laboratorio de control y calidad, y a las personas encargadas del transporte de la Universidad de Pamplona, quienes, con mucha comprensión, paciencia y disponibilidad, aportaron su granito de arena para el desarrollo satisfactorio de este trabajo.*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
JUSTIFICACION .....	18
OBJETIVOS .....	20
Objetivo General .....	20
Objetivos Específicos .....	20
MARCO REFERENCIAL .....	21
Marco Contextual .....	21
Ubicación del área de estudio .....	21
Pamplona, Norte de Santander .....	21
Relleno sanitario “La Cortada”, Pamplona .....	22
Universidad de Pamplona .....	23
Marco Teorico .....	23
Tratamiento biológico.....	23
Proceso anaerobio .....	24
Ventajas de la digestión anaerobia .....	26
Etapas de la digestión anaerobia .....	26
Reactores anaeróbicos.....	32

El filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA).....	34
Digestión anaerobia en fases separadas .....	36
Ventajas de la separación en fases .....	36
Desventajas de la separación en fases .....	37
Parámetros operacionales de la digestión anaerobia .....	37
Lixiviado.....	41
Biogás .....	42
Cinética de la digestión anaerobia .....	43
Ecuación de Monod.....	44
Marco de Antecedentes .....	46
Internacionales.....	46
Nacionales.....	47
Regional .....	48
Marco Legal.....	50
<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>53</b>
Caracterización del Lixiviado.....	54
Montaje de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Separado en Fases (TRI-FAFS) ..	55
Materiales y equipos .....	56
Pretratamiento.....	57
Sistema de alimentación .....	59

Sistema de calefacción.....	59
Preparación del sustrato de alimentación.....	60
Disposición volumétrica de los reactores (TRI-FAFS) .....	61
Disposición de caudales y cargas orgánicas volumétricas por reactor .....	62
Inoculación, Arranque y Adaptación de los TRI-FAFS.....	63
Operación de los Reactores (TRI-FAFS) y Evaluación de las Eficiencias .....	64
Muestras.....	64
Determinación de las eficiencias .....	64
Determinación de las Cinéticas de Reacción Mediante Análisis Microbiológico.....	65
Crecimiento bacteriano para conteo y aislamiento. ....	66
Medios modificados .....	66
Cinética de crecimiento bacteriano.....	67
RESULTADOS Y ANALISIS.....	68
Caracterización del Lixiviado.....	68
DQO Y DBO <sub>5</sub> .....	71
Índice de biodegradabilidad.....	71
pH.....	72
Alcalinidad.....	72
Montaje de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Separado en Fases (TRI-FAFS) ..	72
Pretratamiento .....	72



Construcción y disposición volumétrica de los filtros (TRI-FAFS).....	75
Preparación del sustrato de alimentación.....	76
Disposición de caudales y cargas orgánicas volumétricas.....	77
Inoculación, Arranque y Adaptación de los TRI-FAFS.....	78
Operación de los Reactores TRI-FAFS y Evaluación de las Eficiencias.....	79
Determinación de las eficiencias .....	79
Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS - R1 .....	80
Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R2 .....	81
Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R3 .....	83
Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R4 .....	85
Variación de pH del afluente respecto al efluente de los TRI-FAFS.....	86
Comparación del rendimiento de degradación de los cuatro TRI-FAFS y determinación del optimo .....	88
Determinación de las Cinéticas de Reacción Mediante Análisis Microbiológico.....	90
Crecimiento bacteriano para conteo y aislamiento. ....	90
Aislamiento de hidrolíticas-acidogénicas en agar selectivo.....	93
Aislamiento de acetogénicas y metanogénicas en agar selectivo .....	96
Cinética de crecimiento bacteriano.....	99
CONCLUSIONES .....	112
RECOMENDACIONES .....	115

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 116

ANEXOS..... **¡Error! Marcador no definido.**

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros que influyen en el control del proceso anaerobio .....	34
Tabla 2	Ventajas y desventajas de FAFA .....	35
Tabla 3	Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.....	38
Tabla 4	Parámetros más relevantes que van a determinar la digestión anaerobia .....	40
Tabla 5	Características generales del biogás (Deublein Dieter and Steinhauser Angelika, 2011) .....	43
Tabla 6	Clasificación general del lixiviado por edad, según Renou, et al., 2007 .....	69
Tabla 7	Edad del relleno y tipo de lixiviado, según Amokrane, Comel, & Veron , 1997 .....	69
Tabla 8	Caracterización Lixiviado .....	70
Tabla 9	Eficiencias Pretratamiento .....	74
Tabla 10	Sustrato de alimentación .....	76
Tabla 11	Disposición de parámetros para los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI- FAFS).....	77
Tabla 12	Afluentes, efluentes y eficiencias R1 .....	80
Tabla 13	Afluentes, efluentes y eficiencias R2 .....	82
Tabla 14	Afluentes, efluentes y eficiencias R3 .....	83
Tabla 15	Afluentes, efluentes y eficiencias R4 .....	85
Tabla 16	pH en el afluente y efluente de los cuatro TRI-FAFS.....	87
Tabla 17	Eficiencia máxima Vs Tiempo de retención hidráulica .....	89
Tabla 18	Posibles especies en la fase 1 .....	95
Tabla 19	Posibles especies en la fase 2 .....	98
Tabla 20	Posibles especies en la fase 3 .....	98

Tabla 21	Conteo por descripción específica DIA 1 .....	99
Tabla 22	Conteo por descripción específica DIA 2 .....	101
Tabla 23	Conteo total DIA 1 .....	103
Tabla 24	Conteo total DIA 2 .....	104
Tabla 25.	Crecimiento de microorganismos de cada fase por 7 días .....	105
Tabla 26	Tiempo de generación por fase .....	110
Tabla 27	Cálculos ecuación de Monod .....	110
Tabla 28	Constantes por fase .....	111

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de Pamplona, Norte de Santander.....	23
Figura 2. Localización Relleno Sanitario La Cortada.....	23
Figura 3 Localización Universidad De Pamplona.....	24
Figura 4. Degradación Biológica de la Materia Orgánica.....	25
Figura 5. Balance Anaerobio de la Materia orgánica.....	26
Figura 6. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos.....	28
Figura 7. Sistemas Anaerobios.....	34
Figura 8. Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) .....	35
Figura 9 Diseño de pretratamiento.....	59
Figura 10 Separación de fases.....	77
Figura 11 Diagrama TRI-FAFS.....	78
Figura 12 Crecimiento Fase 1.....	94
Figura 13 Crecimiento fase 2.....	94
Figura 14 Crecimiento fase 3.....	95
Figura 15. Agar yema de huevo, Klebsiella, Pseudomonas, gram negativa.....	96
Figura 16 Agar EMB, Klebsiella, Enterobacter, Serratia, gram negativas.....	96
Figura 17 Agar leche, Bacillus gram positivas.....	97
Figura 18 Agar para acetogénicas, crecimiento de colonias acetogénicas.....	100
Figura 19 Agar para metanogénicas, crecimiento de colonias translucidas metanogénicas ..	100

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Conversión del etanol en ácido acético .....	30
Ecuación 2 Conversión del ácido propiónico en ácido acético .....	30
Ecuación 3 Conversión del ácido butírico en ácido acético .....	30
Ecuación 4 Conversión del ácido acético en biogás .....	32
Ecuación 5 Ecuación de Monod.....	44
Ecuación 6. Cálculo de dilución de una concentración.....	60
Ecuación 7. Cálculo de carga orgánica volumétrica .....	62
Ecuación 8. Cálculo de caudal .....	62
Ecuación 9. Cálculo de eficiencias de remoción.....	65

## INTRODUCCION

Los rellenos sanitarios es la practica más utilizada inicialmente como solución para la disposición final de los residuos sólidos municipales, pero generando como consecuencia un nuevo problema en el control de las emisiones liquidas y gaseosas potencialmente peligrosas tanto para el ambiente como para los seres vivos, producidas por la actividad de degradación y descomposición de la materia orgánica presente en los desechos, esto nos muestra que se requieren nuevas alternativas y estrategias más profundas para la solución del problema inicial de los residuos

Históricamente estos rellenos sanitarios han tenido una evolución en sus diseños y manejos, sin embargo, no se había tenido en cuenta el control de los vertimientos líquidos (lixiviados), permitiendo así que estos escurran a fuentes superficiales de agua, o por infiltraciones en el terreno lograban llegar a contaminar acuíferos y aguas subterráneas.

Una alternativa tecnológica para el tratamiento, control y debido manejo de aguas residuales como los lixiviados, es el tratamiento biológico con procesos aeróbicos y anaeróbicos. Estos sistemas han demostrado buena eficiencia en la remoción de la porción soluble de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Villegas, 2003).

En los últimos años se han venido realizando muchos experimentos para optimizar la eficiencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se han implementado distintos tipos de materiales para la fabricación de reactores, variando las dimensiones, formas, ajustes operacionales, tipos de enzimas, cultivos bacterianos y condiciones hidráulicas con el fin de

encontrar la máxima eficiencia en remoción de materia orgánica, definir la cinética del crecimiento biológico, y en base a ésta determinar los parámetros de diseño físico.

En la actualidad ha mostrado gran importancia los reactores de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), como tratamiento biológico en la depuración de las aguas residuales, teniendo siempre en cuenta su eficiencia en operación y beneficios hacia la comunidad. En general los FAFA se han usado para el tratamiento de aguas residuales domésticas diluidas y pretender evaluar cuál es el comportamiento operativo, una vez se incremente la concentración del agua residual (Castaño, 2002).

En este trabajo se propuso evaluar la óptima operación para un reactor FAFA implementado tres fases separadas y diferentes tiempos de retención hidráulico, así como al crecimiento de biomasa a partir de análisis microbiológico utilizando para el análisis el reactor con parámetros operativos óptimos, con el fin de establecer un sistema amigable pretendiendo colaborar con el mejoramiento y conservación de nuestro medio ambiente y un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.



## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Debido a el acelerado crecimiento demográfico ha sido imposible el adecuado cubrimiento de los servicios públicos para toda la población, ocasionando así la descarga indiscriminada de aguas residuales a las fuentes de agua superficiales o subterráneos, excediendo la capacidad de regeneración y sostenimiento del medio ambiente, mostrando un gran deterioro y graves consecuencias para el ecosistema y todos los seres que interactúan en él.

Un gran ejemplo de esto; son los rellenos sanitarios generadores de lixiviados, los cuales son aguas residuales que contienen altas concentraciones de materia orgánica y al no ser tratados y controlados debidamente llegan fácilmente a cuerpos hídricos por infiltración o escorrentías

En razón de lo expuesto, actualmente se han venido diseñando distintos sistemas de tratamientos biológicos para aguas residuales, por medio de reactores ejecutados por procesos aerobios y anaerobios, con los cuales se obtenga la máxima eficiencia en la remoción de materia orgánica, teniendo como objetivo final no afectar la calidad de cuerpos hídricos al descargar vertimientos con bajas concentraciones.

Para aportar una solución que optimice la remoción de materia orgánica en las aguas residuales, en el caso de esta investigación con lixiviados, se estudia y evalúa la eficiencia en función del tiempo de retención hidráulica (TRH) de filtros anaerobios de flujo ascendente separado en tres fases (TRI-FAFS), con la esperanza de que en generaciones futuras logren utilizar este método a grandes escalas y así remediar dicho problema de contaminación de nuestras fuentes de agua mundialmente.

## JUSTIFICACION

La cantidad generada de lixiviados es baja comparada con los volúmenes producidos en otros tipos de aguas residuales como las domésticas, sin embargo, los contaminantes que contiene son extremadamente peligrosos. De acuerdo con (Tizaoui, Bouselmi, Mansouri, & Ghrabi, 2007) cuando los lixiviados migran de la basura y alcanzan cuerpos de agua, pueden afectar la salud humana y ambientes acuáticos. En términos generales, cuando estos líquidos no son controlados -captados, almacenados y tratados- pueden permear hasta llegar al agua subterránea o mezclarse con aguas superficiales y contribuir a la contaminación de suelo, agua subterránea y superficial (Deng & Englehardt , 2007)

Uno de los tratamientos que se les puede dar a estos residuos es mediante los filtros anaerobios de flujo ascendente los cuales han mostrado tener buenas eficiencias en cuanto a remoción de materia orgánica, muchos autores han recomendado la separación en fases de la digestión anaerobia para lograr mayores porcentajes de remoción en las aguas residuales, y así mejorar en cierta medida la calidad de estas aguas para posteriormente ser dispuestas en fuentes de agua cumpliendo con la norma vigente para vertimientos. (Cohen, 1983) y (Romero, 2001) han recomendado separar la hidrólisis y formación de ácidos grasos de la fermentación metanogénica a fin de mejorar la eficiencia de estos procesos de tratamiento, de los cuales no se conocen criterios específicos de diseño.

Esta separación de etapas o fases supone teóricamente la división de los microorganismos encargados de llevar el proceso de la digestión anaerobia (hidrolíticos-acidogénicos, acetogénicos, metanogénicos) (Ghosh & Pohland, 1971).

Por lo tanto, en esta investigación inicialmente se evaluará la mayor eficiencia de remoción de materia orgánica en un lixiviado recolectado del relleno sanitario “la cortada” de la ciudad de Pamplona, y en segunda medida se determinará el crecimiento microbiológico que se está presentando en cada una de las tres fases de los filtros anaerobios de flujo ascendente. En investigaciones anteriores realizadas y dirigidas por el M.Sc. Julio Isaac Maldonado, ya se han venido evaluando los parámetros operacionales y de diseño que optimizan la remoción de materia orgánica, por esto y tomando como guía estas investigaciones se toman a consideración la distribución de volúmenes para cada una de las fases trabajadas en los filtros (TRI-FAFS) que son: primera y segunda 10% cada una (fase no metanogénica) y tercera 80% (fase metanogénica), así como la temperatura de operación igual a 34°C (Leal Carrillo , Serrano Garcia , & Maldonado M, 2016).

Es de suma importancia tanto ambiental como social encontrar una solución eficiente para el tratamiento de los lixiviados, ya que, por su gran contenido de materia orgánica, compuestos contaminantes y su facilidad para infiltrarse en el suelo hasta llegar a masas de agua subterráneas o al ser arrojados a cuerpos hídricos superficiales sin previo tratamiento, puede generar fuertes impactos a los ecosistemas en general, generando efectos negativos en la salud a los seres vivos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar el rendimiento de la degradación de la materia orgánica en filtros anaerobios separados en tres fases (TRI-FAFS) y de la cinética de reacción.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer las características fisicoquímicas del lixiviado a tratar.
- Operar reactores TRI-FAFS a escala laboratorio utilizando como sustrato lixiviados de rellenos sanitarios con tiempos de retención hidráulica de 8, 12, 16 y 20 horas aproximadamente.
- Realizar determinación de concentración de DQO a la entrada y salida durante la operación los reactores de filtros anaerobios (TRI-FAFS).
- Evaluar las eficiencias de los reactores TRI-FAFS en función del Tiempo de retención hidráulico
- Determinar las cinéticas bacterianas de crecimiento en las fases del reactor (TRI-FAFS), con el tiempo de retención hidráulica óptimo.

## MARCO REFERENCIAL

### Marco Contextual

#### Ubicación del área de estudio

La presente investigación se llevará a cabo en la Universidad de Pamplona campus principal, utilizando en conjunto el laboratorio de aguas, aire y suelo; laboratorio de control y calidad; laboratorio de microbiología Gimbio; para llevar a cabo el montaje de los filtros anaerobios de flujo ascendente en fases separadas (TRI-FAFS), así como los respectivos análisis de parámetros en las muestras de lixiviado. El lixiviado que se utilizará como sustrato será tomado del relleno sanitario “La Cortada” de la ciudad de Pamplona

#### *Pamplona, Norte de Santander*

Pamplona es un municipio colombiano, ubicado en el departamento de Norte de Santander. Está localizada 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 km<sup>2</sup> 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, 2018).



**Figura 1.** Localización de Pamplona, Norte de Santander. Fuente. (Alcaldía, 2018)

### ***Relleno sanitario “La Cortada”, Pamplona***

Se encuentra ubicado en el municipio de Pamplona, vereda de Chichira, al costado Nororiental de la vía pamplona Chitaga a la altura del kilómetro 3.5. Presenta una temperatura promedio de 14,9°C



**Figura 2** Localización Relleno Sanitario La Cortada. Fuente. Google Earth

## ***Universidad de Pamplona***

La universidad de Pamplona sede principal está ubicada en Pamplona ciudad universitaria en el Km 1 Vía Bucaramanga, allí se trabajó en el laboratorio de aguas, aire y suelo, el laboratorio de control y calidad y en el laboratorio de microbiología Gimbio, donde se realizaron todos los respectivos montajes del sistema, pruebas de laboratorio y análisis microbiológicos.



**Figura 3.** Localización Universidad De Pamplona. Fuente Google Earth

## **Marco Teorico**

### **Tratamiento biológico.**

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.

“El oxígeno no es imprescindible, ya que los microorganismos son capaces de degradar la materia orgánica también en condiciones anaerobias. Este aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente.” (Ingeniería ambiental para el sector industrial, 2014)

### Proceso anaerobio



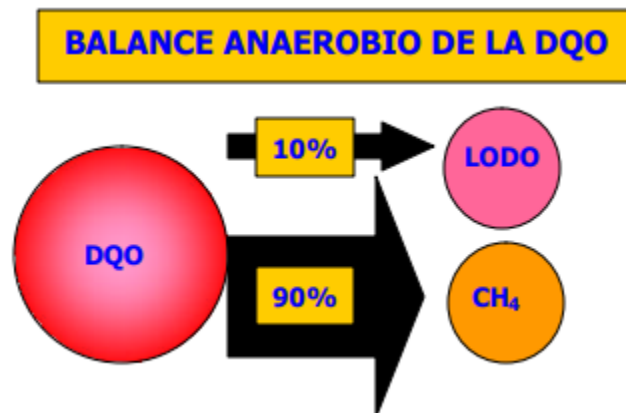
**Figura 4.** Degradación Biológica de la Materia Orgánica. Fuente. (Rodríguez V.)

El tratamiento biológico anaerobio o digestión anaerobia, es un mecanismo que en ausencia de oxígeno degrada u oxida la materia orgánica, generando como producto biogás gracias a la acción de grupos diferentes de microorganismos divididos en cuatro etapas secuenciales que son: *Hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.*



“El proceso microbial es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones paralelas y en serie, interdependientes entre sí. Como subproducto se obtiene un gas, denominado usualmente biogás, cuya composición básica es metano  $\text{CH}_4$  y dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  en un 95 %, pero con la presencia adicional de nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno, usualmente en proporciones inferiores al 1%.” (Romero Rojas, 2004)

En la digestión anaerobia se presenta un proceso de transformación y al no presentar un oxidante en el proceso no se presenta destrucción de la materia orgánica, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece en el metano producido. Se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%).



**Figura 5** Balance Anaerobio de la Materia orgánica. Fuente. (Rodríguez V.) ([www.uasb.org/](http://www.uasb.org/))

### ***Ventajas de la digestión anaerobia***

En el artículo “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EN SISTEMAS ANAEROBIOS TIPO UASB” realizado por (Arango Bedoya & Sanches e Sousa , 2009). Tomaron algunas ventajas de los sistemas anaerobios publicadas por (Chernicharo, 1990) son:

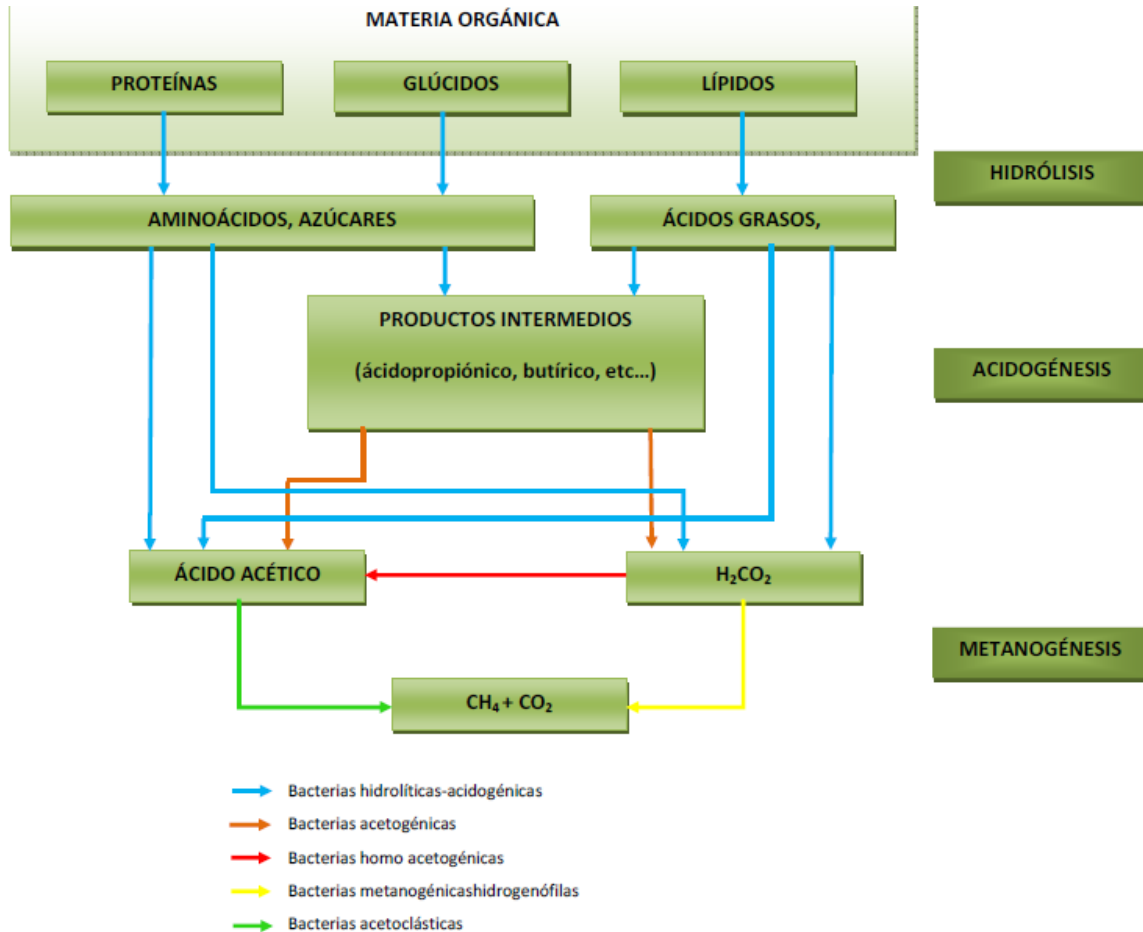
- Producción de metano, gas combustible utilizado como fuente de energía
- Menor consumo de energía comparado con los tratamientos aeróbicos, resultando en costos operacionales más reducidos.
- La fracción de materia orgánica convertida en células bacterianas es relativamente baja (cerca de 10%) en relación al tratamiento aerobio (cerca de 50%). Esto significa que la cantidad de fango biológico formado es menor, resultando en menores problemas de disposición de los mismos.
- Las unidades de tratamiento son cerradas evitando la generación de olores
- Tolerancia a elevadas cargas orgánicas

### ***Etapas de la digestión anaerobia***

Estas etapas se caracterizan principalmente por las poblaciones de microorganismos que presenten, mostrando cada una de ellas diferentes rasgos como las velocidades de crecimiento y reacción en la degradación de la materia orgánica y sensibilidad a los compuestos intermedios que se generan en cada etapa y actúan como inhibidores, y a las condiciones físicas que se estén dando en el reactor.

De forma general, se identifican cinco grandes poblaciones bacterianas, las cuales actúan catalizando los procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

(González Cabrera, 2014)



**Figura 6.** Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos. Fuente 1. (González Cabrera, 2014) p. 24

### Hidrólisis

Inicialmente las bacterias hidrolíticas, mediante transformaciones enzimáticas, fermentan los compuestos orgánicos complejos como lípidos, proteínas hidratos de carbono y compuestos inorgánicos, en compuestos de masa molecular baja como los azúcares, aminoácidos, ácidos

grasos y glicerol, adecuados para emplearlos como fuente de energía y de carbón celular. Los microorganismos encargados de esto son las bacterias hidrolíticas-acidogénicas. (Romero Rojas, 2004).

Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que llevan a cabo esta reacción son los miembros de la familia Enterobacteriaceae, además de los géneros: *Saccharobacterium*, *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Saerobacter*, *Micrococcus* y *Clostridium*.” (Díaz Báez, Espitia Vargas , & Molina Pérez, 2002)

En el libro *Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología* (Díaz Báez, Espitia Vargas , & Molina Pérez, 2002) encontramos que en la hidrólisis se presentan las siguientes reacciones:

- Hidrólisis de hidratos de carbono en azúcares.
- Hidrólisis de proteínas en aminoácidos.
- Hidrólisis de lípidos en aminoácidos y AGCL

### **Acidogénesis**

En esta etapa por la acción de microorganismos y bacterias fermentativas o bacterias acidogénicas a través de un proceso de fermentación transforman las moléculas de cadenas más cortas, o grasas producto de la hidrólisis, en ácidos grasos volátiles (AGV) como el ácido acético, propiónico, butírico, entre otros, además de hidrógeno y dióxido de carbono. “Durante esta etapa fermentativa no existe realmente estabilización, sino una transformación de material orgánico complejo en compuestos más simples”. (Romero Rojas, 2004)

Las bacterias acidogénicas que comúnmente se han identificado interviniendo en esta etapa son: el *Butyvirio*, *Propionbacterium*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococos* y *Enterobacterias*. (González Cabrera, 2014).

En el libro *Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología* (Díaz Báez, Espitia Vargas , & Molina Pérez, 2002) nos muestra las reacciones que se presentan en esta etapa son dos:

- Acidogénesis de azúcares en AGV (acetato, propionato, valerato, butirato) y mezclas de  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ .
- Acidogénesis de aminoácidos en AGV (acetato, propionato, valerato, butirato) y mezclas de  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ .

Generalmente en aguas residuales encontramos moléculas como polisacáridos, proteínas y lípidos los cuales son degradados en las primeras etapas (hidrolisis y acidogénesis), por la acción de enzimas correspondientes para cada molécula y bacterias fermentativas, comúnmente facultativas. (Díaz Báez, Espitia Vargas , & Molina Pérez, 2002)

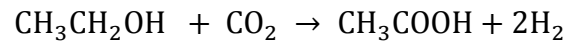
- Polisacáridos: la celulosa, el almidón y la pectina su proceso se lleva a cabo por acción de enzimas como las celulasas, amilasas y pectinasas
- Proteínas: su proceso se lleva a cabo por acción de enzimas proteasas
- Lípidos se produce por medio de las enzimas lipasas y bacterias fermentativas.

## Acetogénesis

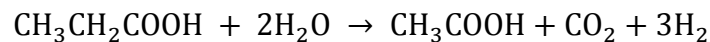
En esta fase las bacterias acetogénicas descomponen los ácidos grasos volátiles, en ácidos de un solo carbono. “Los productos de la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono mediante las *bacterias acetogénicas*” (Romero Rojas, 2004)

“El etanol, el ácido propiónico y el ácido butírico son convertidos en ácido acético por bacterias acetogénicas, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:” Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (Comisión Nacional del Agua)

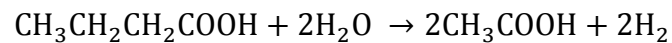
Ecuación 1 *Conversión del etanol en ácido acético*



Ecuación 2 *Conversión del ácido propiónico en ácido acético*



Ecuación 3 *Conversión del ácido butírico en ácido acético*



En el libro *Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología* (Díaz Báez, Espitia Vargas, & Molina Pérez, 2002) nos muestra las reacciones que se presentan en:

- Acetogénesis de AGCL.
- Acetogénesis de propionato.

- Acetogénesis de valerato y butirato.

La acetogénesis es llevada a cabo por medio de enzimas deshidrogenasas, organismos acetogénicos productores obligados de hidrógeno, homo-acetogénicas. Se considera que son tres los grupos que intervienen (Moletta, 1993): las bacterias homo-acetogénicas, las bacterias sintótrofa0s (o OHPA - Obligate Hydrogen Producing Acetogen-) y las bacterias sulfato-reductoras.

### **Metanogénesis**

“En esta etapa a partir del ácido acético y fórmico, ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) y metanol, las bacterias metanogénicas producen metano, dióxido de carbono y agua” (Romero Rojas, 2004) (Metcalf & Eddy, 1995)

Estos microorganismos metanogénicos son estrictamente anaeróbicos, con metabolismos lentos el cual resulta siendo un factor limitante en la degradación de los residuos orgánicos, y muy sensibles a los cambios de temperatura y pH repentinos.

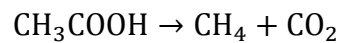
Según (Metcalf & Eddy, 1995) “En un digestor anaeróbico, las dos rutas principales de producción de metano son:

- La formación de metano por la reducción del  $\text{CO}_2$  con el  $\text{H}_2$  por intermedio de las *bacterias metanogénicas hidrogenoflicas*.
- La producción de metano a partir del acetato por medio de las *bacterias metanogénicas acetoclásticas*”.

En el libro *Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología* (Díaz Báez, Espitia Vargas, & Molina Pérez, 2002) en la metanogénesis se presenta: la metanogénesis acetotrófica con transformación de acetato en metano y la metanogénesis hidrogenotrófica con transformación de mezclas  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$  en metano, llevadas a cabo por bacterias metanogénicas anaerobias estrictas.

Se estima teóricamente que el 73% del metano ( $\text{CH}_4$ ) formado en procesos anaerobios, se da por los productos de la acetogénesis y el restante se da en la acidogénesis.

Ecuación 4 *Conversión del ácido acético en biogás*



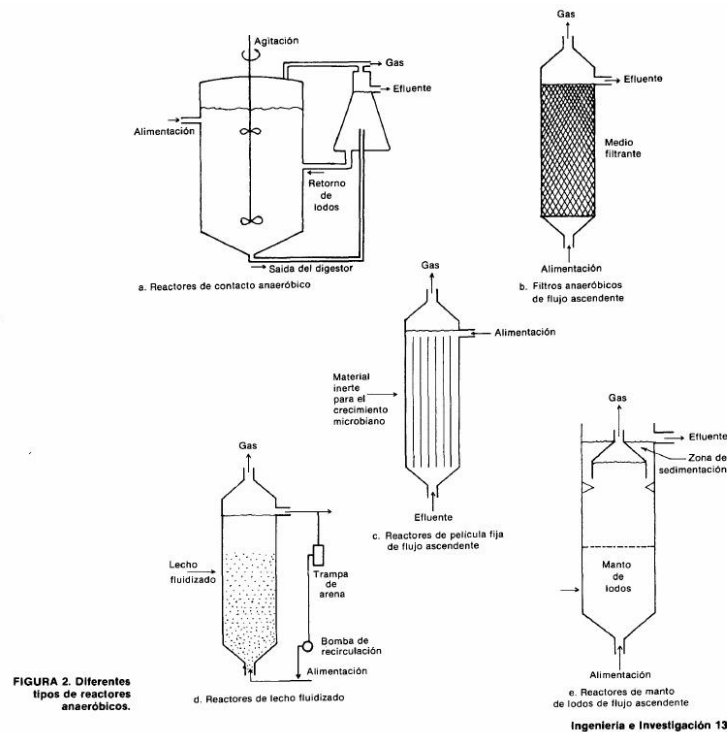
### **Reactores anaeróbicos**

Los reactores anaerobios son sistemas diseñados para la depuración de aguas residuales que contengan altas concentraciones de materia orgánica, con el fin de que dichos vertimientos sean adecuados para su disposición a cuerpos hídricos.

Estos reactores biológicos trabajan con microorganismos que no requiere de oxígeno para su crecimiento y que producen metano ( $\text{CH}_4$ ) en su proceso de formación, gracias a esto su consumo de energía es bajo y utilizar el metano formado como alternativa de combustible.



Debido al lento desarrollo de los microorganismos formadores de metano en la llamada metanogénesis, la retención y desarrollo de biomasa en el reactor es una pieza primordial para el diseño y operación de este tipo de sistemas. Gran parte de estas bacterias que intervienen en el proceso tienen la facultad de aglomerarse unas con otras formando lo llamados flocs, o unirse a superficies. Así es como se ha podido desarrollar procesos estables y eficientes. “En la actualidad una serie de reactores avanzados de alta tasa que aseguran una eficiente retención de la biomasa, se presentan como nuevas alternativas de tratamiento. Dentro de estos se pueden mencionar los presentes en la imagen.” (Díaz Baez, , 1987)



**Figura 7.** Sistemas Anaerobios. Fuente: (Díaz Baez, , 1987)

Para un eficiente funcionamiento de la digestión anaerobia es necesario verificar parámetros que pueden afectar el proceso como lo son las características del agua residual, como el contenido de compuestos tóxicos, la concentración de materia orgánica, la temperatura, el pH, los nutrientes.

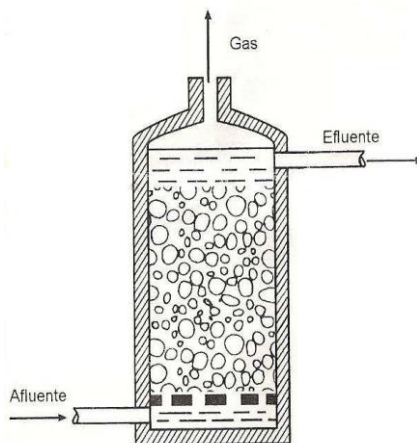
“En los filtros anaerobios de flujo ascendente se ha observado que al impedir que las bacterias retenidas en el medio filtrante escapen por el efluente, se presenta un tiempo de residencia celular (edad del lodo) cercano a los 100 días. Este largo tiempo de permanencia celular se logra con tiempos cortos de residencia hidráulica.” (Comisión Nacional del Agua).

Tabla 1 *Parámetros que influyen en el control del proceso anaerobio*

Parámetros	
Físicos	Temperatura, mezclado, pH, sólidos totales y volátiles
Químicos	Alcalinidad total, producción de gas, nitrógeno orgánico y total, fosfatos, sulfuros, AGV, (ácidos grasos volátiles), DBO, DQO, Ni, Co, Cu, Na, y Fe
Biológicos	Huevos de helmintos, coliformes fecales y totales

Fuente (Comisión Nacional del Agua)

### El filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA)



**Figura 8.** Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA). Fuente (Romero Rojas, 2004)

El filtro anaerobio de flujo ascendente es un proceso de crecimiento adherido propuesto por Young y McCarty en 1969, para el tratamiento de residuos solubles.

Se trata de un sistema sencillo de tratamiento anaerobio donde la biomasa formada permanece como una película microbial adherida y el flujo ingresa por la parte inferior permitiendo disminuir el riesgo de taponamiento.

Las partes del filtro anaerobio un tanque relleno con un medio sólido para soporte del crecimiento biológico anaerobio, generalmente piedra, con entrada del afluente por la parte inferior, salida del efluente y del biogás producido por la parte superior del sistema.

El agua residual a tratar ingresa de manera ascensional y es puesta en contacto con el crecimiento bacterial anaerobio adherido al medio y como las bacterias son retenidas sobre el medio y no salen en el efluente, es posible obtener tiempos de retención celular prolongados con tiempos de retención hidráulica cortos. “Los filtros anaerobios también pueden ser útiles para desnitrificar efluentes ricos en nitratos o como pretratamiento en plantas de purificación de agua”. (Romero Rojas, 2004)

Tabla 2 *Ventajas y desventajas de FFA*

Ventajas	Desventajas
Resistente a cambios de carga orgánica.	Largo tiempo de arranque
Bajo consumo de energía.	Baja reducción de patógenos y nutrientes
Larga vida útil	Es una alternativa de mejoramiento de la calidad del efluente pero no una alternativa de disposición final, no sustituye al drenaje.
Costos de instalación, operación y mantenimiento moderados.	Requiere hábitos específicos de las viviendas, esto porque las grasas, aceites y residuos sólidos pueden acumularse en el lecho de piedra y obstruir el filtro. No deben disponerse restos de comida, grasas y aceites, o debe contarse con una trampa de grasas

Fuente Tilley, (2010)

## **Digestión anaerobia en fases separadas**

Los primeros en proponer la separación de fases fueron (Ghosh & Pohland, 1971) mediante la implementación de dos reactores. Este mecanismo teóricamente proyecta una separación de las etapas de los grupos de microorganismos acidogénicos y metanogénicos que intervienen en la digestión anaerobia.

“En el reactor acidogénico se desarrolla la hidrólisis y la acidificación, ya que se tienen las condiciones propicias para esta fase como bajos pH y tiempos de retención hidráulicos cortos” (Aslanzadeh , Rajendran, & Taherzadeh, 2014) El resultado final de las primeras etapas de llevan a las siguientes donde se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis

En las primeras etapas el proceso es más rápido por lo tanto su volumen puede ser mucho menor a la etapa de metanogénesis pues aquí se presenta un crecimiento más lento de las bacterias intervinientes

### ***Ventajas de la separación en fases***

Entre las ventajas que ofrece la separación de fases están (Arroyave, 1996) (Ince, 1998) (Selvam, Xu, Gu, & Wong, , 2010)

- Existe mayor estabilidad del proceso, debido a que cada grupo de microorganismos tienen condiciones ambientales y operacionales adecuadas para su crecimiento

- Es posible manejar los choques de carga, gracias a la resistencia de los organismos acidogénicos
- Existe una tolerancia mayor a cargas moderadas de tóxicos que pueden ser degradados por bacterias acidogénicas
- Se tienen mayores eficiencias de reducción de DQO y mayor producción de biogás, principalmente en el tratamiento de desechos fácilmente hidrolizables
- Remoción de compuestos indeseables como el Fósforo y los nitratos acidogénicos

### ***Desventajas de la separación en fases***

Las limitaciones que presenta la digestión en fases separadas son las siguientes (Arroyave, 1996) (Ince, 1998)

- Mayores costos de inversión y operacionales (adición de reactivos químicos y construcción de otra unidad de reacción)
- Alta acumulación de sólidos en el reactor acidogénico
- Efectos negativos en el reactor metanogénico, producidos por la presencia de sólidos suspendidos en el efluente del reactor acidogénico

### ***Parámetros operacionales de la digestión anaerobia***

La eficiencia del proceso es restringida por las condiciones naturales y de operación en que se desarrolle. Por tanto, se debe tener un control de estos parámetros, según (González Cabrera, 2014) algunos de ellos son:

## pH:

El pH va a ser un parámetro fundamental para el desarrollo de la máxima actividad por los microorganismos que se identifican en cada una de las fases:

- microorganismos hidrolíticos pH entre 7,2 y 7,4
- microorganismos acetogénicos pH entre 7 y 7,2
- microorganismos metanogénicos pH entre 6,5 y 7,5

## Temperatura de operación.

El proceso de digestión anaerobia se ve directamente afectado por la temperatura con la cual se realice la operación del sistema, pues las velocidades de reacción de los diferentes grupos de microorganismos dependen de este parámetro.

En la siguiente tabla podemos observar datos importantes asociados a estos rangos de temperatura. Las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, y en el rango termofílico se consigue una mayor destrucción de patógenos.

Tabla 3 *Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.*

Bacterias	Rango de Temperaturas			Tiempo de retención (días)	Sesibilidad
	Mínimo	Óptimo	Máximo		
Psicrofílicas	4-10	15-18	25-30	>100	±2°C/hora
Mesofílicas	15-20	28-33	35-45	30-60	±1°C/hora
Termofílicas	25-45	50-60	75-80	10-16	±0,5°C/hora

Fuente Santianes, Martín et al.; Comando 2006. Tomado de (González Cabrera, 2014)

La temperatura con la cual se lleve a cabo la operación es uno de los factores más importantes a tener en cuenta ya que si se utiliza rangos de temperatura muy bajos habrá poca reacción y crecimiento de los microorganismos, en caso contrario al utilizar temperaturas altas del rango de termofílicas se tendrán mayores costos en equipos, tuberías, válvulas y accesorios y será necesario un gasto mayor de energía en el proceso. Para mejores resultados del sistema se recomiendan temperaturas en el rango mesofílico (temperaturas en torno a los 28-33°C).

“Otro factor a tener en cuenta al trabajar en este rango termofílico es que los microorganismos que predominan en este rango son mucho más sensibles que los microorganismos característicos del rango mesófilo, a ligeros aumentos en la concentración de materia orgánica, cambios de temperatura, cantidades de tóxicos presentes en el residuo que alimenta al digestor” (González Cabrera, 2014).

### **Agitación/mezclado**

Por diferentes razones es necesario mantener un grado de agitación en el medio en el que se está dando la digestión anaerobia:

- Con el mezclado se consigue un homogenizado del substrato de alimentación con el substrato en digestión.
- Se alcanza una distribución uniforme del calor para mantener una isoterma correcta.
- Se evita la formación de espumas y la sedimentación. o Se favorece la transferencia de gases que pueden formar burbujas en el substrato

### **Tiempo de retención.**

“El tiempo de retención va a ser el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, es decir, es el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor sometido a la acción de los microorganismos.” (González Cabrera, 2014)

### **Carga orgánica volumétrica**

“Se define como la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. Un valor bajo de velocidad de carga orgánica implica una baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención, mientras que su incremento conlleva una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida. Por este motivo se tendrá que buscar un valor óptimo desde el punto de vista técnico y económico para cada instalación y residuo a tratar.” (González Cabrera, 2014).

Tabla 4 *Parámetros más relevantes que van a determinar la digestión anaerobia*

Parámetros ambientales	Parámetros operacionales
pH	Temperatura
Potencial redox	Agitación/mezclado
Nutrientes	Tiempo de retención
Tóxicos e inhibidores	Velocidad de carga orgánica

Fuente Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Tomado de (González Cabrera, 2014)



## **Lixiviado**

La disposición final de los residuos sólidos municipales es llevada a cabo en rellenos sanitarios donde ocurre una descomposición bioquímica de la materia orgánica, generando aguas residuales llamadas lixiviados, la cuales son arrastradas por fuentes externas de agua como lluvias, llevando consigo materiales disueltos o en suspensión y salen finalmente por la acción de la gravedad por la parte más baja del relleno sanitario. Este líquido tiende a salir por gravedad, por la parte inferior del Relleno Sanitario, hasta que una capa impermeable lo impida. (Ministerio del Medio Ambiente , 2002)

Hay que tener en cuenta que la composición de los lixiviados es compleja y variada ya que esta va en función de los residuos presentes en el vertedero como de los procesos de descomposición de estos que dependen a su vez de múltiples factores entre los que se encuentran:

- Las condiciones climáticas y meteorológicas
- Propiedades de los residuos propiamente dichos
- Disposición de los mismos
- Edad del relleno

“La concentración de contaminantes de los lixiviados varía con el tiempo, por lo que difícilmente puede emplearse con éxito un único tratamiento a estos líquidos. Lixiviados jóvenes, poseen elevadas concentraciones de materia orgánica e índices de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO) superiores a 0.4, lo que hace posible que sean tratados eficientemente por

procesos biológicos; pero en lixiviados de rellenos viejos, con índices inferiores a 0.02, estos tratamientos no son eficientes” (Waritch & Sharma , 1998)

El lixiviado representa un posible riesgo de contaminación tanto del suelo y el subsuelo como de las corrientes superficiales y sub-superficiales aledañas, debido a la comunicación hidráulica que poseen los acuíferos [Torres, 2005]. Comparado con las posibles emisiones de gases de vertedero los lixiviados son emitidos durante un periodo de tiempo mucho más largo. [Steiner, 2008]. Tomado de (Leal Carrillo , Serrano Garcia , & Maldonado M, 2016)

## **Biogás**

El biogás es el resultado de un proceso anaerobio (en ausencia de oxígeno), por la acción de degradación de materia orgánica donde intervienen microorganismos principalmente bacterias metanogénicas y otros factores. Es llamado biogás a una mezcla formada por metano ( $\text{CH}_4$ ) entre un 40% a 70%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y proporciones menores de otros gases como hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

Este producto es considerado útil y de valor, ya que puede ser utilizado como combustible, en la generación de energía eléctrica mediante un mecanismo de turbinas debidamente adaptadas para tal efecto. (Mediterráneo, 2010)

Tabla 5 *Características generales del biogás (Deublein Dieter and Steinhauser Angelika, 2011)*

Característica	Referencia
Composición	55 - 70 por ciento metano (CH <sub>4</sub> ) 30 - 45 por ciento dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
Contenido de energía	6.0 - 6.5 kWh/m <sup>3</sup>
Equivalente de combustible	0.6 - 0.651 aceite /m <sup>3</sup> biogás
Límites de explosión	6 - 12 % biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de metano anteriormente mencionado)
Presión crítica	75 - 89 bar
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg/m <sup>3</sup>
Olor	huevo podrido (el olor de biogás desulfurado es apenas perceptible)
Masa molar	16.043 kg k/mol

Fuente (Comisión Nacional del Agua)

### **Cinética de la digestión anaerobia**

Gracias al consumo y transformación de sustrato orgánico e inorgánico, mediante reacciones de oxido-reducción los microorganismos encargados de llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia logran obtener la energía potencial almacenada en los enlaces y distribuirla en su interior para posteriormente canalizarla ya sea para su crecimiento o su reproducción.

“a partir de los conceptos básicos relacionados con los procesos biológicos de degradación anaerobia, es posible entender el comportamiento microbiano y por tanto generar condiciones que favorezcan su crecimiento a fin de optimizar su desempeño” (Padilla Gasca , 2010)

La concentración del catalizador o biomasa activa y la concentración de sustrato primarios de alimentación que sirve como donador de electrones, son los factores condicionantes de la velocidad a la cual la materia orgánica o un determinado contaminante es removido. Uno de los

modelos más usados para describir la cinética del crecimiento microbiano es la ecuación de Monod (Capítulo VI. Cinética de la digestión anaerobia)

### ***Ecuación de Monod***

Tomado de la revisión bibliográfica (Fernández Güelfo , 2008)) y (Capítulo VI. Cinética de la digestión anaerobia). El modelo de Monod relaciona la velocidad específica del crecimiento microbiano con la concentración de un sustrato donador de electrones limitante. Este modelo es el más ampliamente utilizado para la modelización de procesos microbianos. La ecuación de Monod se representa de la siguiente manera:

*Ecuación 5 Ecuación de Monod*

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + S}$$

Donde:

$\mu$  = Representa la velocidad específica de crecimiento de los microorganismos ( $t^{-1}$ )

$\mu_{max}$  = Es un parámetro cinético que representa el valor máximo de la velocidad específica de crecimiento de los microorganismos que se da cuando la concentración de sustrato es saturante ( $t^{-1}$ )

$K_s$  = Es un parámetro cinético que representa la constante de saturación por sustrato de la ecuación de Monod ( $ML^{-3}$ )

$S$  = Concentración de sustrato

La relación entre las cinéticas de utilización de sustrato y la cinética de crecimiento de microorganismos se admite que viene dada por la hipótesis de Gaden (Gaden, 1959).

$$\mu * Xv = Y_{x|s} * \left(-\frac{dS}{dt}\right)$$

Donde:

$Y_{x/s}$  = Representa el coeficiente de rendimiento biomasa/sustrato (adimensional).

$Xv$  = representa la concentración de microorganismos activos o viables presentes en el sistema ( $ML^{-3}$ )

Por tanto, sustituyendo la ecuación de Monod en la anterior relación, se obtiene que:

$$\left(-\frac{dS}{dt}\right) = \frac{\mu_{max}}{Y_{x|s}} \cdot \left(\frac{S}{K_s + S}\right) * Xv$$

Dependiendo de las características del proceso y de las velocidades de crecimiento de los microorganismos involucrados, la concentración de microorganismos viables en el sistema  $Xv$  podría mantenerse aproximadamente constante, o bien, variará de acuerdo con lo indicado por la aproximación cinética utilizada (Gaden, 1959).

## Marco de Antecedentes

La digestión anaerobia en fases separadas ha sido investigada y aplicada a varios tipos de agua residual industrial, obteniendo resultados satisfactorios en términos de reducción de carga orgánica.

### Internacionales.

- Según estudios se ha aplicado la digestión anaerobia en dos fases al agua residual de extracción de aceite de palma con DQO de 63.000 mg/L. En el estudio, realizado por Ng et al. (1999), se obtuvo una eficiencia de reducción de DQO del 90% aplicando Carga Orgánica Volumétrica (COV) de 11 kg DQO/m<sup>3</sup> \*d y un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 21 h en reactores completamente mezclados (RCM).  
(Casanova,2017)
- Otros han estudiado el tratamiento del agua residual de la producción de café instantáneo. Dinsdale et al. (1997) Estos autores encontraron que en el Reactor Acidogénico (RA) en condiciones termofílicas, se obtuvo una acidificación de 37% y en el Reactor metanogénico (RM), que es del tipo UASB, se obtuvo una reducción de 77% de la DQO, con COV superiores a 16 kg DQO kg DQO/m<sup>3</sup> \*d y un TRH en el RM de 12 h.
- En un estudio en el que se usó un reactor híbrido UASB/FAFA se observó que el lixiviado de un relleno sanitario reciente, es susceptible al tratamiento anaerobio debido a la elevada fracción orgánica que contiene, pero debe tenerse especial cuidado

con el manejo de los compuestos inorgánicos, especialmente los metales pesados. (Iza, Keenan y Switzwenbaum, 1992)

## **Nacionales**

En Colombia, se han realizado estudios de implementación de la digestión anaerobia en fases separadas, para el tratamiento de agua residual industrial con medianas y altas concentraciones de DQO. Son ejemplos de esta aplicación el tratamiento de agua residual de la cervecería, procesadoras avícolas, agua residual de extracción de yuca y aguas mieles del café (Arroyave, 1996).

- En la evaluación de reactores UASB y filtros anaerobios (FAFA) a escala laboratorio. Se observó que al operar COV entre 1 y 25 Kg DQO/m<sup>3</sup> /día, Tiempos de Retención Hidráulico (TRH) entre 3 y 5 días, en el UASB, se alcanzaron eficiencias de remoción de DQO entre el 30 y 90%. El lodo usado tenía una Actividad Metanogénica Específica (AME) entre 0.08 y 0.20 Kg DQO/m<sup>3</sup> /día. En el filtro anaerobio (FAFA), el inóculo estaba aclimatado al desecho, y el arranque duró 9 meses, aplicándose concentraciones de DQO hasta de 15.500 mg/l con TRH entre 5h y 1 día con recirculación continua. Según Agudelo (1998) se alcanzaron eficiencias de remoción en DQO de 90%.
- En el estudio realizado por Arenas & Marin (2004), operaron 105 días un sistema de reactores UASB a escala piloto tratando lixiviados también del relleno sanitario La Esmeralda de Manizales, logrando resultados favorables a forzar continuamente las

condiciones hidráulicas del sistema, llegando hasta un TRH de 18 horas, donde es importante de resaltar de la capacidad de los reactores para superar la carga de diseño.

- Osorio Trujillo & Vásques Botero (2007), realizaron la evaluación de la remoción de materia orgánica en un agua residual sintética utilizando filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFAs), utilizando dos filtros uno con carga baja y otro con carga alta, TRH= 12 horas y T°= 22°C aproximadamente; donde lograron obtener una reducción de la materia orgánica hasta de un 63%, presentando mayor remoción y mayor estabilidad con una carga alta, debido a que se obtiene mayor crecimiento bacteriano
- Según estudios hechos por Torres Lozada P (2010), trabajaron la evaluación y comparación a escala del arranque de un reactor UASB para tratar (ARD) agua residual domestica (R1), con dos reactores de pH acondicionado, para tratar mezclas de lixiviados con ARD en proporciones volumétricas de 5% (R2) y 10% (R3) de lixiviado, su investigación mostró que con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de ocho horas, R1 y R2 alcanzaron eficiencias promedio de reducción de 66% y 73% de demanda química de oxígeno (DQO) y de 90% y 84% de sólidos suspendidos totales (SST), respectivamente. En R3 el TRH óptimo fue mayor y las eficiencias de reducción de DQO y SST fueron menores.

## **Regional**

- Resaltando investigaciones más cercanas, donde se aplicaron filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases para el tratamiento de lixiviado intermedio de rellenos sanitarios, aplicando cargas volumétricas distintas (BAJA= 2.25 kg/m<sup>3</sup>.dia; MEDIA=



3.45 kg/m<sup>3</sup>.dia; ALTA= 4.64 kg/m<sup>3</sup>.dia), temperaturas de 20, 27 y 34°C, con un tiempo de retención hidráulica de 18 horas; consiguiendo en el estudio una eficiencia máxima de 72,86% en remoción de DQO para una temperatura de 34°C. Rodríguez J.A., Maldonado, J., Cajiao, A., (2017)

- Leal, Y., Serrano, F., Maldonado, J., (2016) realizaron un biotratamiento de lixiviados en sistemas anaerobios de tres fases separados con relaciones para un diseño optimo volúmenes 10%-10%-80% en cada una de las fases, con cargas orgánicas volumétricas distintas (BAJA= 1,7 kg/m<sup>3</sup>.dia; MEDIA = 2,6 kg/m<sup>3</sup>.dia; ALTA = 3,5 kg/m<sup>3</sup>.dia), un tiempo de retención hidráulica de 16 horas y a temperatura de 34°C, obteniendo como resultado eficiencia mayores al 85% en remoción de DQO
- López, N., Jiménez, L., Maldonado, J., (2017), desarrollaron un biotratamiento de lixiviados con microorganismos anaerobios mesófilos en filtros de tres fases (Hidrolisis-Acidogénesis, Acetogénesis, Metanogénesis), con cargas orgánicas volumétricas distintas (BAJA= 2,25 kg/m<sup>3</sup>.dia; MEDIA=3.45 kg/m<sup>3</sup>.dia; ALTA = 4.64 kg/m<sup>3</sup>.dia), tiempo de retención hidráulica de 16 horas, temperaturas 20,27 y 34°C y relaciones de volúmenes 10/10/80, con esto se obtuvo como resultado en el estudio una eficiencia de remoción de DQO superior al 90%.

## Marco Legal

Norma	Descripción
<b>Ley 23 del 12 de diciembre de 1973</b>	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.
<b>Decreto N° 2811 de diciembre 18 de 1974</b>	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
<b>Ley 9 de enero 24 de 1979</b>	Por la cual se dictan Medidas Sanitarias
<b>Decreto 2104 de 1983.</b>	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
<b>Decreto N° 1594 de junio 26 de 1984</b>	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.
<b>Resolución N° 2309 de 1986</b>	Dicta normas para el manejo de residuos especiales, su almacenamiento transporte tratamiento y demás medidas generales
<b>Ley 99 de diciembre 22 de 1993.</b>	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.
<b>Resolución N° 1096/ Reglamento</b>	. Presenta principios fundamentales y criterios operacionales que deben seguir para realizar una adecuada gestión de residuos

<p><b>interno del sector agua potable y saneamiento básico. RAS 2000</b></p>	<p>sólidos y peligrosos en todos los componentes con miras a la minimización de riesgos a la salud y el medio ambiente durante dicha gestión</p>
<p><b>Ley 715 de 2001</b></p>	<p>Establece el sistema general de participaciones, constituido por los recursos que la nación transfiere a las entidades territoriales. 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><b>Decreto N° 1713 de 6 de agosto de 2002</b></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><b>Resolución N° 1045 del 26 septiembre de 2003</b></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 PGISR 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 Rellenos Sanitario.</p>
<p><b>Decreto 838 de marzo de 2005.</b></p>	<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>

<b>Decreto N° 3930 de 2010</b>	Establece los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público
<b>Decreto N° 4728 de 2010</b>	"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010"

## METODOLOGIA

El presente estudio se ha realizado con el fin de evaluar y determinar el funcionamiento de filtros anaerobios de flujo ascendente separado en tres fases en cuanto a la eficiencia que se puede obtener en la degradación de la materia orgánica de un agua residual, en esta ocasión lixiviado recolectado del relleno sanitario “La cortada” de la ciudad de Pamplona, en función del tiempo de retención hidráulica (TRH), cumpliendo así uno de los objetivos el cual es visibilizar las variables optimas con las que se obtenga mayor eficiencia de remoción y con el determinar la cinética de crecimiento biológico que se está presentando en el interior del reactor.

El desarrollo de esta investigación se lleva en cinco (5) etapas que son:

- Caracterización del lixiviado sustrato.
- Montaje de los filtros anaerobios de flujo ascendente separado en fases (TRI-FAFS).
- Inoculación, arranque y adaptación de los TRI-FAFS.
- Operación de los reactores (TRI-FAFS) y evaluación de las eficiencias.
- Determinación de las cinéticas de reacción mediante análisis microbiológico.

Esta investigación ha sido llevada a cabo en la Universidad de Pamplona utilizando para su satisfactoria realización las instalaciones del laboratorio de aguas, aire y suelo, donde se realizó el montaje y operación de los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS); el laboratorio de control y calidad, donde se llevó a cabo la caracterización del lixiviado, así como la medición de los parámetros para determinar las eficiencias de remoción de materia orgánica; y el

laboratorio de microbiología GIMBIO, en donde se realizaron los cultivos microbianos para cinéticas de crecimiento.

En este literal se describirá a detalle la metodología, los materiales y equipos, y cada una de las actividades que fueron necesarias para el completo desarrollo de cada etapa.

### **Caracterización del Lixiviado**

El vertimiento utilizado como sustrato es el lixiviado debido a la alta contaminación que éstos causan sobre los cuerpos de agua, para demostrar que por medio del biotratamiento anaerobio se puede mejorar las condiciones de este antes del vertimiento. En este caso el lixiviado a utilizar como sustrato es el proveniente del Relleno Sanitario La Cortada del municipio de Pamplona N. de S.

Para la caracterización del lixiviado se realiza la recolección de la muestra en el relleno sanitario la cortada de Pamplona, se almacena esta muestra a 4°C para su posterior análisis en el laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona, mediante técnicas analíticas establecidas en el Stándar Methods For Examination of Wáter and Wastewater. pruebas donde se evaluarán las concentraciones de los parámetros físicos-químicos determinando en lo posible los siguientes parámetros:

- DQO
- DBO<sub>5</sub>
- SST
- SSV
- Fosfatos
- Sulfatos

- Nitritos
- N-amoniaco
- Alcalinidad
- Dureza
- pH
- Acidez
- Turbidez
- Conductividad
- Color

### **Montaje de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Separado en Fases (TRI-FAFS)**

Para las dimensiones utilizadas para el diseño y montaje de los cuatro filtros anaerobios de flujo ascendente separado en tres fases (TRI-FAFS), se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas en proyectos de grado dirigidos por el M.Sc Julio Isaac Maldonado, tomando así parámetros para la operación y demás variables de interés, como la temperatura óptima para su desarrollo.

Las dimensiones de los reactores son:

- Altura útil total del filtro = 1.2 m
- Diámetro del filtro = 2 ½"
- Diámetro interno ajustado = 66.07 mm
- Área del filtro =  $3.43 \times 10^{-3}$  m
- Volumen útil del filtro = 4.11 L
- Volumen del tanque de alimentación = 50L

## **Materiales y equipos**

Para el montaje y diseño de los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS) se utilizaron los siguientes materiales:

- Recipientes de 20 litros para el transporte del lixiviado desde el relleno sanitario hasta las instalaciones del laboratorio de aguas de la Universidad de Pamplona
- Tanques de almacenamiento de 80 litros
- Trampa de grasas a escala laboratorio en vidrio, ya diseñada en los trabajos anteriores dirigidos por el M. Sc Julio Isaac Maldonado.

### **Cuerpo del TRI-FAFS**

- Tubería de PVC de alta presión  $\phi= 2 \frac{1}{2}$ "
- Uniones lisas PVC  $\phi= 2 \frac{1}{2}$ " de alta presión
- Tapones soldados de PVC  $\phi= 2 \frac{1}{2}$ " de alta presión
- Tapones roscados de PVC  $\phi= 2 \frac{1}{2}$ " de presión alta
- Adaptadores machos PVC  $\phi= 2 \frac{1}{2}$ " de presión alta
- Tubería de PVC de  $\phi= 1$ "
- Adaptadores machos PVC  $\phi= 1$ "
- Tapones roscados de PVC  $\phi= 1$ "
- Rejillas de PVC
- Mangueras de  $\frac{1}{4}$ "
- Micro válvulas



- Tee de plástico de ¼"
- Abrazaderas
- Tubería de PVC de  $\phi = \frac{1}{2}$ " de agua caliente

### **Sistema de bombeo, calentamiento y agitación**

- Recipiente de aluminio de 50 litros
- Una resistencia eléctrica 1500 Watts y 110 V.
- Calefactor de temperatura variable 15 a 27 °C
- Termostato
- Sensor de temperatura (Termocuplas)
- Contactor eléctrico
- Motor eléctrico
- Eje vertical con hélices
- Sistema de poleas y correas
- Cuatro bombas peristálticas dosificadoras

### **Pretratamiento**

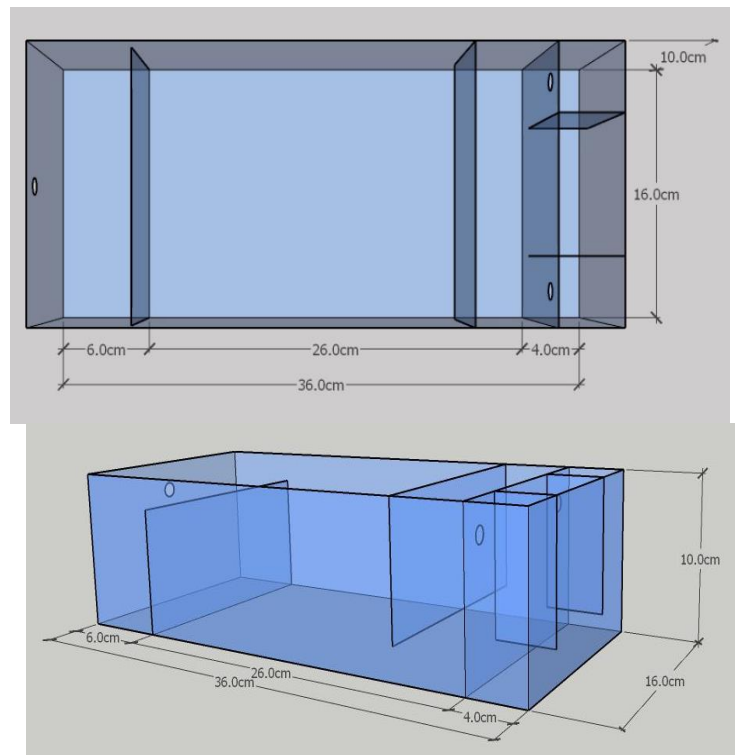
Inicialmente el tanque de almacenamiento de 80 litros, situado a una cota alta en el laboratorio, es llenado manualmente con lixiviado crudo desde donde por gravedad es conducido el líquido residual a la unidad de pretratamiento.

El pretratamiento es físico y consta de una trampa de grasas la cual funciona al mismo tiempo como un sedimentador, estas unidades utilizadas son las mismas usadas en los proyectos

“Determinar el volumen metanogénico requerido en el proceso de remoción de materia orgánica. Empleando filtros anaerobios de flujo ascendente separados en dos fases (DI-FAFS).”

(Rodríguez J. –Maldonado J.I., 2015) y “Biotratamiento de lixiviados en sistemas anaerobios de tres fases” (Leal Carrillo , Serrano Garcia , & Maldonado J.I, 2016).

La trampa de grasa se incluye en sistemas de tratamiento, con el objeto de prevenir el taponamiento de las tuberías y daños en unidades posteriores; es el sistema más sencillo para remoción de grasas y aceites no emulsificados. Los métodos estándar definen grasas y aceites como grupos de sustancias con características físicas similares. El término grasas y aceites incluye materiales de origen vegetal, materiales de tejido animal, petróleo o componentes del petróleo y otros materiales (Mendoza, 2009)



**Figura 9.** Diseño de pretratamiento. Fuente: J. Rodríguez y Maldonado, 2015.

## **Sistema de alimentación**

El sistema de alimentación de los cuatro reactores (TRI-FAFS), está compuesto por un depósito de 50 litros, el cual mantiene una agitación mediante un sistema de ejes verticales con hélices, accionados por un motor eléctrico, para asegurar una constante mezcla del sustrato.

Dicha alimentación es complementada con un sistema de calentamiento quienes aseguran una temperatura constante de 34 °C; la cual se tomó así teniendo como guía las investigaciones anteriormente realizadas y dirigidas por el M.Sc Julio Isaac Maldonado.

Seguidamente el bombeo se realiza por succión del depósito de alimentación conducido hacia la parte inferior de cada uno de los reactores asegurando así su flujo ascendiente mediante cuatro bombas peristálticas soportadas sobre una estructura metálica, dispuestas con un caudal definido para cada una de ellas, calculado para cada TRH de 8, 12, 16 y 20 horas aproximadamente, estos tiempos serán condicionados y podrán variar dependiendo de la operación y exactitud en la que se pueda graduar el caudal aportado por las bombas dosificadoras.

## **Sistema de calefacción**

Para lograr mantener la temperatura constante de alimentación se implementa un sistema de calentamiento construido con la colaboración del Ingeniero Electrónico Carlos Vides, usado inicialmente en el trabajo de grado de Rodríguez J.A. y Maldonado J.I. (2015) y seguidamente

por (Leal Carillo, Serrano García, & Maldonado J.I., 2016), (López Sepúlveda, Jiménez Rojas, & Maldonado J.I., 2017).

El sistema consta de una resistencia de estufa eléctrica de 110 voltios, la cual proporciona calor a el tanque de alimentación de aluminio, un controlador electrónico y termocupla interconectados entre sí, quienes se encargan de encender y apagar las resistencias asegurando así mantener la temperatura de 34°C constante en el depósito 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 los reactores mantuvieran la temperatura de 34°C en todas las fases, se incorporó un cerramiento tipo invernadero con plástico y un ventilador de calefacción de 1500 W.

### **Preparación del sustrato de alimentación**

Para la alimentación del sistema debe realizarse una dilución del lixiviado recolectado del relleno sanitario la cortada de Pamplona, 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 limpia y lixiviado para obtener la concentración de DQO deseada para trabajar los reactores (TRI-FAFS) mediante la siguiente ecuación

Ecuación 6. *Cálculo de dilución de una concentración*

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

Donde:

$C_1$ = 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

### **Disposición volumétrica de los reactores (TRI-FAFS)**

Las fases separadas de los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), propuesta inicialmente por Pohland y Ghosh en 1971, supone teóricamente la separación de las etapas del proceso anaerobio (hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis), sabiendo que la etapa de metanogénesis es la que presenta menor velocidad de reacción y degradación de los compuestos, y es la que necesita mayor volumen (80% del volumen útil) para una efectiva reproducción y crecimiento de microorganismos, a comparación de la fase no metanogénica (Hidrolisis + Acidogénesis y Acetogénesis) que ocuparía el 20% del volumen útil (Maldonado, Rodríguez chona, & Cajiao, 2015), se dispuso de una relación de volumen en cada fase así:

Fase 1 = Hidrolisis + Acidogénesis (10%)

Fase 2 = Acetogénesis (10%)

Fase 3 = Metanogénesis (Volumen Óptimo Constante 80%)

Este trabajo pretende verificar mediante análisis microbiológico, que microorganismos son los que se encuentran presentes en cada una de las fases del TRI-FAFS, verificando si efectivamente se está presentando esta separación de las etapas de la digestión anaerobia

## **Disposición de caudales y cargas orgánicas volumétricas por reactor**

Los caudales (Q), son regulados por medio de bombas peristálticas dosificadoras, una para cada reactor conectadas todas a el depósito de alimentación de donde succionan y llevan el sustrato a los reactores.

Las cargas orgánicas volumétricas, así como los tiempos de retención hidráulica fueron condicionados a los caudales aportados y regulados por las bombas dosificadoras. Las ecuaciones utilizadas fueron:

Ecuación 7. *Cálculo de carga orgánica volumétrica*

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

Ecuación 8. *Cálculo de caudal*

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

Donde:

COV= Carga orgánica volumétrica

Q= Caudal

[DQO]= Concentración de DQO deseada (2250 mg DQO/l)

V= Volumen total útil

TRH= Tiempo de retención hidráulica

## **Inoculación, Arranque y Adaptación de los TRI-FAFS**

Para realizar la inoculación de los filtros anaerobios de flujo ascendente se utilizó como inóculo metanogénico estiércol de cerdo, el cual fue obtenido en un criadero de cerdos localizado en la ciudad de Pamplona, elegido por su gran cantidad y diversidad de microorganismos indispensables para que se dé el proceso de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Para la preparación del inóculo se diluyeron 5 kg de estiércol en 10 litros de agua, se hizo pasar esta mezcla por un colador para retirar todos los sólidos y evitar así taponamientos en los filtros de las bombas, así como en los reactores al pasar el inóculo por ellos.

Durante un periodo de tiempo se recirculo por cada reactor TRI-FAFS una mezcla compuesta por 10 litros de inóculo y 10 litros de lixiviado sustrato y 30 litros de agua, esto con el fin de lograr una adaptación de la biomasa, un crecimiento de microorganismos los cuales actuaran en la digestión anaerobia y un debido arranque del sistema con este tipo de residuo líquido.

Para el arranque de los filtros de fases separadas se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones iniciales:

- DQO inicial: 2250 mg DQO/l, para todos los reactores
- Temperatura = 34°C (óptima para sistemas anaerobios)

## **Operación de los Reactores (TRI-FAFS) y Evaluación de las Eficiencias**

Después de finalizada la etapa de adaptación y arranque del sistema de digestión anaerobia, se inició la operación de los TRI-FAFS, alimentándolo diariamente con lixiviado a una concentración de DQO de 2250 mg DQO/l hasta la alcanzar la estabilización del proceso.

Durante esta etapa se tomaron muestreos a la entrada y salida de los reactores, midiendo DQO para así determinar la eficiencia obtenida en cada uno de ellos.

### **Muestreos**

Se realizarán muestreos semanales tomando mediciones a la entrada y salida de cada reactor. En cada muestreo se harán mediciones de parámetros como DQO, pH, en:

- Muestra 1: Entrada (depósito de alimentación)
- Muestra 2: Salida de cada uno de los reactores

### **Determinación de las eficiencias**

Teniendo en cuenta la concentración inicial de DQO usada por los filtros y la concentración final a la salida de cada uno de ellos, se realizan los cálculos pertinentes determinando el porcentaje de eficiencia, así como su curva en cada reactor Utilizando la siguiente ecuación que permite cuantificar el porcentaje de eficiencia que es la siguiente.



Ecuación 9. *Cálculo de eficiencias de remoción*

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

Donde:

E= Eficiencia

DQOi = Concentración de DQO inicial o a la entrada

DQOf: Concentración de DQO final o a la salida

### **Determinación de las Cinéticas de Reacción Mediante Análisis Microbiológico**

El análisis microbiológico se llevó a cabo en el laboratorio de microbiología GIMBIO, contando con la instrucción de la docente Angela Maritza Cajiao y el apoyo del semillero SIMBIO

Tomando a consideración los resultados obtenidos al determinar las eficiencias de remoción de materia orgánica, se continua la investigación estudiando a fondo el filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS) óptimo, es decir, aquel en el cual se obtuvo mayor remoción de materia orgánica. Con el fin de analizar qué tipo de microorganismos se encuentran presentes en cada fase los cuales llevan a cabo la digestión anaerobia, así como obtener la cinética de crecimiento microbiológico

## **Crecimiento bacteriano para conteo y aislamiento.**

Para dar inicio a esta etapa de la investigación, se realiza el muestreo en el reactor óptimo, tomando muestra del medio de soporte con biomasa adherida (encontrado dentro de cada fase del filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS)), presente en cada una de las fases del reactor, de lo anterior se lleva a cabo la respectiva siembra en medios modificados, con el fin de lograr realizar un conteo de unidades formadoras de colonia y aislar los microorganismos que se puedan presentar, para así mismo llegar a determinar los posibles microorganismos que permanecen en cada una de las fases y que llevan a cabo las etapas de la digestión anaerobia.

### ***Medios modificados***

Los medios de cultivo modificados se requieren según tipo de sustrato a evaluar, lo anterior con el fin de mantener estable el metabolismo y acondicionamiento para el crecimiento de las células bacterias sin generar un mayor traumatismo; además es de considerar que el metabolismo anaeróbico es menos eficiente que el aeróbico para la obtención de energía, por lo tanto, los medios de cultivo modificados le proporcionan mayor cantidad de nutrientes específicos (lodos, lixiviados etc.), en el caso actual anaerobios facultativos, además requieren una incubación más prolongada. Los medios empleados para la recuperación de anaerobios deben incluir tipos no selectivos y enriquecidos. (SPS, Medio modificado, Agar yema de huevo, Agar leche, EMB, Medios para Acetogénicas y Metanogénicas)

El medio modificado para el crecimiento microbiológico es realizado a partir de una mezcla con el lixiviado recolectado del relleno sanitario La Cortada de la ciudad de Pamplona, esto para crear una similitud del medio en el que crecen dentro de los filtros (TRI-FAFS) y así asegurar que se va a presentar un crecimiento de los microorganismos.

### **Cinética de crecimiento bacteriano**

Se realiza la toma de muestras utilizando el filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS) con el cual se obtuvo el mayor rendimiento en degradación de materia orgánica.

Para recolectar la muestra es necesario abrir el reactor por el tubo lateral con tapón que se tiene en cada una de las fases, con ayuda de unas pinzas largas se extrae uno de los medios de soporte con biomasa adherida, con el cual se va a realizar las diluciones para siembra de microorganismos.

Las muestras se toman cada 6 horas en cada una de las fases por un periodo de 2 días, con el fin de lograr llevar un seguimiento del crecimiento que presenten los microorganismos, las respectivas siembras se realizan en un medio de cultivo SPS, realizando diluciones de  $10^{-1}$  y  $10^{-2}$  de cada muestra.

Para obtener las constantes cinéticas que rigen este proceso, se ha utilizado el modelo cinético de Monod que permite obtener la velocidad máxima de utilización de sustrato o rendimiento  $Y$ , y la constante cinética de crecimiento  $K$ .

## **RESULTADOS Y ANALISIS.**

### **Caracterizacion del Lixiviado**

Se caracterizaron tres (3) muestras de lixiviados, tomadas de forma puntual en el efluente de los pozos de almacenamiento del relleno sanitario La Cortada de la ciudad de Pamplona Para la caracterización se tuvo en cuenta las especificaciones propuestas Stándar Methods For Examination of Wáter and Wastewater. Donde se evaluaron las propiedades físico-químicas mostradas anteriormente en el capítulo de Metodología.

Las muestras se tomaron en recipientes plásticos con capacidad de 2,5 litros, cantidad suficiente para determinar la concentración de los parámetros dichos anteriormente

Las características de los lixiviados varían notablemente debido a factores tales como: la composición y edad de los residuos, la disponibilidad de oxígeno y la humedad, el diseño y la operación del vertedero, las precipitaciones, la hidrología del lugar, la compactación de los residuos, el diseño de la cobertura, los procedimientos de muestreo, la interacción entre los lixiviados y el medio ambiente. (Arrechea, Torres, Lloréns, & Díaz, 2015).

Según diversos autores, los lixiviados se pueden clasificar según la edad del relleno sanitario en: jóvenes o nuevos, intermedios y viejos, dependiendo de sus datos registrados en diferentes parámetros. A continuación, se muestran algunas de estas clasificaciones y su autor:

Tabla 6 *Clasificación general del lixiviado por edad, según Renou, et al., 2007*

	Nuevo	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 – 10	>10
pH	6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	>10000	4000 – 10000	<4000
DBO <sub>5</sub> /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 2 Renou, et al., 2007

Tabla 7 *Edad del relleno y tipo de lixiviado, según Amokrane, Comel, & Veron, 1997*

	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 <sub>5</sub> /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)

“Lixiviados jóvenes, poseen elevadas concentraciones de materia orgánica e índices de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO) superiores a 0.4, lo que hace posible que sean tratados eficientemente por procesos biológicos; pero en lixiviados de rellenos viejos, con índices inferiores a 0.02, estos tratamientos no son eficientes” (Waritch & Sharma, 1998)

A continuación, se presentan los valores obtenidos en las caracterizaciones realizadas durante la investigación, así como sus valores promedios de cada parámetro evaluado:

Tabla 8 *Caracterización Lixiviado*

CARACTERIZACIÓN LIXIVIADO RELLENO SANITARIO "LA CORTADA" PAMPLONA					
PARAMETRO	UNIDAD	1	2	3	PROMEDIO
DQO	mg/L	13700	4050	5350	7700
DBO <sub>5</sub>	mg/L	6560	1250	2500	3436,7
DBO <sub>5</sub> /DQO	---	0,48	0,31	0,47	0,4
ST	mg/L	11600	13200	11513	12104,3
SST	mg/L	1000	17330	560	6296,7
SSV	mg/L	43500	30260	260	24673,3
Fosfatos	mg /L PO <sub>4</sub>	320	300	460	360
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub>	200	200	200	200
Nitritos	mg/L N-NO <sub>2</sub>	1,85	1,4	0,4	1,2
N-amoniacal	mg/L N-NH <sub>3</sub>	---	955	1070	1012,5
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	6500	7600	9500	7866,7
Dureza	mg CaCO <sub>3</sub> /L	10000	7500	8000	8500
pH	---	8,3	8,92	8,96	8,7
Acidez	mg CaCO <sub>3</sub> /L	2500	7000	8500	6000
Turbidez	UNT	3200	929	565	1564,7
Color	UPC	22400	23100	21600	22366,7
Conductividad	ms/cm	16,191	18,79	19,42	18,1

Teniendo en cuenta la clasificación general de los lixiviados por edad, según distintos autores y haciendo una comparación con los datos de la caracterización del lixiviado estudiado, obtenidos en el laboratorio de control y calidad de la Universidad De Pamplona, se puede clasificar como un lixiviado intermedio, debido a: DQO promedio igual a 7700 mg/L, el cual pertenece a el rango establecido por Amokrane, Comel, & Veron , (1997) y Renou, et al., (2007), y por su índice de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DOQ) promedio igual a 0.4, estando entre en rango intermedio según Amokrane, Comel, & Veron , (1997) y Waritch & Sharma , (1998).

Siendo así este lixiviado apto para el tratamiento biológico por las altas concentraciones de materia orgánica y la relación DBO<sub>5</sub>/DOQ que presenta, y adecuado para la concentración de 2250mg/l que será utilizada para el desarrollo de esta investigación.

## **DQO Y DBO<sub>5</sub>**

La concentración de DQO en un efluente puede variar significativamente por diferentes factores entre ellos los tiempos de alta o baja pluviosidad, el tipo de residuos y la edad del lixiviado.

En el lixiviado estudiado, durante las tres (3) caracterización, se obtuvieron valores máximos de 13700 mg/L de DQO y 1000 mg/L de DBO<sub>5</sub>, y valores mínimos de 4050 mg/L de DQO y 125 mg/L de DBO<sub>5</sub>, esta variación se presenta por las altas precipitaciones que se presentan en la ciudad de Pamplona.

Según la normativa ambiental en el decreto 3930 de 2010, donde establece los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos (aguas residuales e industriales, etc.) puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, la concentración permisible en cuanto a DQO es igual a 400 mg/L y a DBO<sub>5</sub> es igual a 200 mg/L, lo que hace necesario y de gran importancia aplicar un proceso de tratamiento que asegure el vertimiento de las mismas al medio ambiente sin peligro de una contaminación de la fuente receptora.

## **Índice de biodegradabilidad**

El índice de biodegradabilidad se obtiene de la relación de la DBO<sub>5</sub> con la DQO y nos representa el grado de biodegradabilidad de una muestra de agua. Por los resultados obtenidos en cada uno de estos parámetros y su relación DBO<sub>5</sub>/DQO promedio igual a 0.4, se dice que el lixiviado tiene una buena degradabilidad; Según (Luo, Qian, Liu, & Xu, 2015) “registros entre 0,1-0,5 se considera que es un lixiviado tipo intermedio con un índice de biodegradabilidad media”.

## **pH**

El pH del reactor afecta el proceso de la digestión anaerobia y eficiencia del proceso de digestión. Los metanógenos trabajan efectivamente entre rango de pH de 6,5-8,2, con un pH óptimo de 7,0. (Kondusamy & Kalamdhad, 2014).

En las muestras analizadas se determino que las condiciones tienden a ser basicas con un valor promedio de pH fue de 8.7 y el minimo de 8.3, lo cual dificulta la digestion anaerobia.

el pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO<sub>2</sub> en el gas del vertedero que está en contacto con el lixiviado.

## **Alcalinidad**

En las pruebas se obtuvieron altos valores de alcalinidad, registrándose como dato promedio 7866,7 mg CaCO<sub>3</sub>/L y un máximo de 9500 mg CaCO<sub>3</sub>/L. “Concentraciones altas de alcalinidad por encima de 6500 mg/L y valores de pH superiores a 7,4 sugieren que la actividad bacteriana puede verse afectada debido a varios efectos tóxicos de alcalinidad. Las sales tóxicas disminuyen la actividad bacteriana” (Yenigun & Demirel, 2013)

## **Montaje de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente Separado en Fases (TRI-FAFS)**

### **Pretratamiento**

El pretratamiento, como se dijo en el capítulo anterior, es llevado a cabo por una trampa de grasas y sedimentador diseñados y operados previamente en otros trabajos de grado dirigidos por el M.Sc. Julio Isaac Maldonado. Cuyos parámetros y dimensiones son las siguientes



## **Cálculos**

$$Q=V/T$$

Q = Caudal

V = Volumen

TRH = Tiempo de retención hidráulico

## **Trampa de Grasa Dimensiones**

Alto = 0,08 metros

Ancho = 0,16 metros

Largo = 0,1 metros

TRH = 12,55 minutos

## **Sedimentador**

Alto = 0,08 metros

Ancho = 0,16 metros

Largo = 0,86 metros

TRH = 107,92 minutos

El lixiviado inicialmente se agregaba manualmente a un tanque de almacenamiento de 80 litros, en el cual quedan retenidos inicialmente los sobre tamaños como palos y ramas que pueda contener el lixiviado recolectado, desde donde pasa con un caudal constante a los sistemas de pretratamiento. Este tratamiento preliminar se hace con el fin de remover inicialmente la mayor cantidad de sólidos sedimentables, grasas, aceites y residuos fácilmente separables, evitando así atascamientos o taponamientos en los filtros de las bombas, mangueras u otros daños en las unidades posteriores.

La eficiencia obtenida en el tratamiento preliminar es en promedio de 3,92% con la ecuación 9, como lo podemos ver en la siguiente tabla:

Tabla 9 *Eficiencias Pretratamiento*

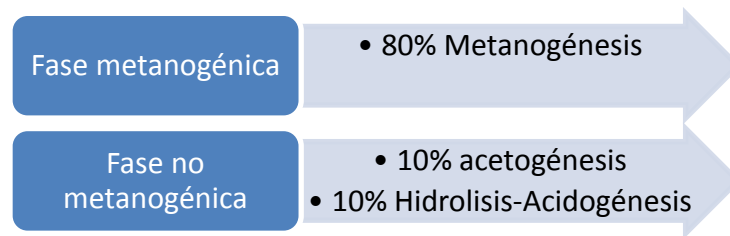
EFICIENCIA PRETRATAMIENTO				
FECHA	PRUEBA	[DQO] <sub>i</sub>	[DQO] <sub>f</sub>	Eficiencia
29-nov-18	1	6800	6500	4,41
23-ene-19	2	8300	8000	3,61
28-ene-19	3	7600	7350	3,29
31-ene-19	4	4350	4150	4,60
04-feb-19	5	10400	10050	3,37
06-feb-19	6	4800	4550	5,21
08-feb-19	7	9000	8700	3,33
14-feb-19	8	7500	7200	4,00
26-feb-19	9	8000	7700	3,75
04-mar-19	10	5500	5300	3,64
PROMEDIO:				3,921

Para este pretratamiento fue necesario realizar un mantenimiento periódico y así evitar que bajara su eficiencia por escapes de grasas o aceites y acumulación de sólidos en el sedimento

## Construcción y disposición volumétrica de los filtros (TRI-FAFS)

Siguiendo lo estipulado en los apartados anteriores para el montaje y construcción de los filtros anaerobios de flujo ascendente en fases separadas (TRI-FAFS), se logró adecuar el sistema de alimentación con su respectivo tanque de 50 litros de capacidad, manteniendo a una temperatura de 34°C el sustrato de alimentación. Esta temperatura se tomó a consideración ya que los microorganismos anaerobios trabajan de manera más eficiente a altas temperaturas y teniendo como guía las investigaciones ya realizadas donde el funcionamiento de estos filtros se a presentado optimo en su eficiencia de remoción de materia orgánica al utilizar dicha temperatura.

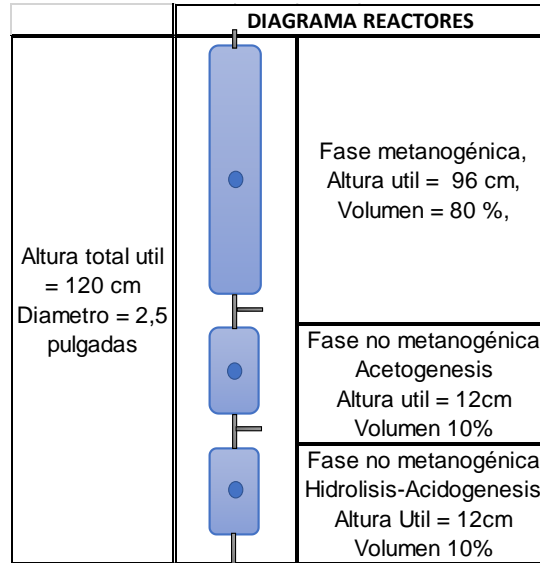
El dimensionamiento de los TRI-FAFS se realizó separando las etapas metanogénica y no metanogénica de la digestión anaerobia de la siguiente manera:



**Figura 10.** Separación de fases.

Su construcción se hizo a partir de un filtro anaerobio de flujo ascendente convencional con una altura total de 1.50 metros y una altura útil de 1.20 metros (altura del medio de soporte). El medio de soporte para el crecimiento adherido de microorganismos utilizado fue tubería de PVC de (1/2") para agua caliente, con un largo aproximado de 1 cm; además de los materiales y

equipos ya descritos. En la siguiente figura podemos ver el diagrama de construcción de cada reactor.



**Figura 11** Diagrama TRI-FAFS

### Preparación del sustrato de alimentación

La concentración utilizada para alimentar los filtros fue de 2250 mg DQO/l, realizada a partir de una dilución del lixiviado del relleno sanitario “La cortada” de la ciudad de Pamplona, como podemos ver en la siguiente tabla:

Tabla 10 *Sustrato de alimentación*

Sustrato de alimentación			
DQO para alimentación:	2250 mg/l	Composición del sustrato	
FECHA	DQO Lixiviado crudo (mg /l)	Lixiviado (Litros)	Agua limpia (Litros)
29-nov-18	6800	16,5	33,5
23-ene-19	8300	13,6	36,4
28-ene-19	7600	14,8	35,2
31-ene-19	4350	25,9	24,1

04-feb-19	10400	10,8	39,2
06-feb-19	4800	23,4	26,6
08-feb-19	9000	12,5	37,5
14-feb-19	7500	15,0	35,0
26-feb-19	8000	14,1	35,9
04-mar-19	5500	20,5	29,5
11-mar-19	8250	13,6	36,4

### Disposición de caudales y cargas orgánicas volumétricas

La alimentación a los filtros fue dada por bombas peristálticas dosificadoras, donde se los caudales para cada uno de los cuatro reactores se graduaron de manera tal que me aportaran aproximadamente los tiempos de retención hidráulica necesarios dichos en los literales anteriores, la concentración del sustrato de alimentación utilizada fue de 2250 mg DQO/l, la cual me daba un COV distinto para cada filtro.

En la tabla 10 podemos observar el Q, TRH y COV dispuesta para la operación de cada filtro anaerobio. Las COV fueron condicionados a los caudales quedando de la siguiente manera:

Tabla 11 *Disposición de parámetros para los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS)*

Reactor	Caudal Q (ml/min)	Tiempo de retención TRH (h)	Carga orgánica volumétrica COV (kg DQO/m <sup>3</sup> .día )
1	8,0	8,6	6,31
2	5,8	11,8	4,57
3	4,0	17,1	3,15
4	3,1	22,1	2,44

## **Inoculación, Arranque y Adaptación de los TRI-FAFS**

La inoculación se realizó a partir del estiércol de cerdo recolectado y diluido como se dijo anteriormente. Este inoculo es indispensable para el arranque de los filtros TRI-FAFS ya que proporciona la biopelícula adherida al medio de soporte, la cual se encarga de la degradación y remoción de la materia orgánica presente en el sustrato a tratar.

El arranque fue llevado a cabo por el inoculo el cual alimento inicialmente a los reactores TRI-FAFS y se dejó en recirculación por un tiempo aproximado de 30 días en el cual periódicamente se le hacía el cambio de la mezcla con inoculo fresco para mejores resultados. Este periodo de tiempo fue debido a problemas institucionales ya que no era posible el ingreso seguido a la Universidad.

Luego de transcurrido este periodo de arranque se siguió alimentando los cuatro filtros con lixiviado diluido por un periodo de 30 días para comenzar la etapa de adaptación de los microorganismos a la materia orgánica presente en el sustrato con el que se trabajó los reactores; durante este tiempo no se logró comenzar a tomar medición de DQO por motivos internos de la Universidad de Pamplona, ya que no se encontraban disponibles los laboratorios para llevar a cabo las pruebas necesarias.

## **Operación de los Reactores TRI-FAFS y Evaluación de las Eficiencias**

Terminado el proceso de adaptación y arranque, comenzó la operación y monitoreo para evaluación de las eficiencias de remoción de materia orgánica medida en DQO. Esta operación se llevó a cabo para los cuatro (4) TRI-FAFS a una temperatura constante de  $34^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), una concentración de DQO en el lixiviado a tratar igual a 2250 mg DQO/L, y con los parámetros mostrados en la tabla 10 de Q, TRH Y COV.

Se realizó un monitoreo y medición de las variables de control DQO y pH, hasta alcanzar condiciones estables, es decir cuando los porcentajes de eficiencia en degradación de materia orgánica llegaron a ser constantes. Gracias a el periodo que tuvo de arranque y adaptación del sistema, no fue muy prolongado el tiempo en lograrse un estado estable del proceso operando con la concentración tratada, llegando a esta condición constante de degradación en 36 días.

### **Determinación de las eficiencias**

Para el cálculo de las eficiencias se utilizó la ecuación 9 para la cual era necesario conocer la concentración de DQO a la entrada y la concentración de DQO a la salida de cada reactor. En los siguientes literales podemos observar la tabla de datos obtenido para los cuatro TRI-FAFS, donde se precisan las fechas en que fueron tomadas las pruebas, el número total de mediciones que se realizaron, la concentración inicial de DQO en el afluente y efluente para cada día, y la

eficiencia en porcentaje obtenida, así como sus respectivas curvas de eficiencia en función del tiempo.

***Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS - R1***

**Parámetros operacionales:**

Q = 8 ml/min

TRH = 8.6 horas

COV = 6.3 kg DQO/m<sup>3</sup>.día

*Tabla 12 Afluentes, efluentes y eficiencias R1*

<b>Filtro TRI-FAFS 1</b>				
<b>FECHA</b>	<b>DIAS</b>	<b>[DQO]i (mg /l)</b>	<b>[DQO]f (mg/l)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
	0	0	0	0
30-ene-19	7	2250	2150	4,44
01-feb-19	9	2250	2100	6,67
04-feb-19	12	2250	2000	11,11
06-feb-19	14	2250	1950	13,33
08-feb-19	16	2250	2150	4,44
11-feb-19	19	2250	2000	11,11
13-feb-19	21	2250	1750	22,22
15-feb-19	23	2250	1650	26,67
18-feb-19	26	2250	1600	28,89
20-feb-19	28	2250	1550	31,11
22-feb-19	30	2250	1550	31,11
25-feb-19	33	2250	1500	33,33
26-feb-19	34	2250	1350	40,00
27-feb-19	35	2250	1450	35,56
28-feb-19	36	2250	1450	35,56

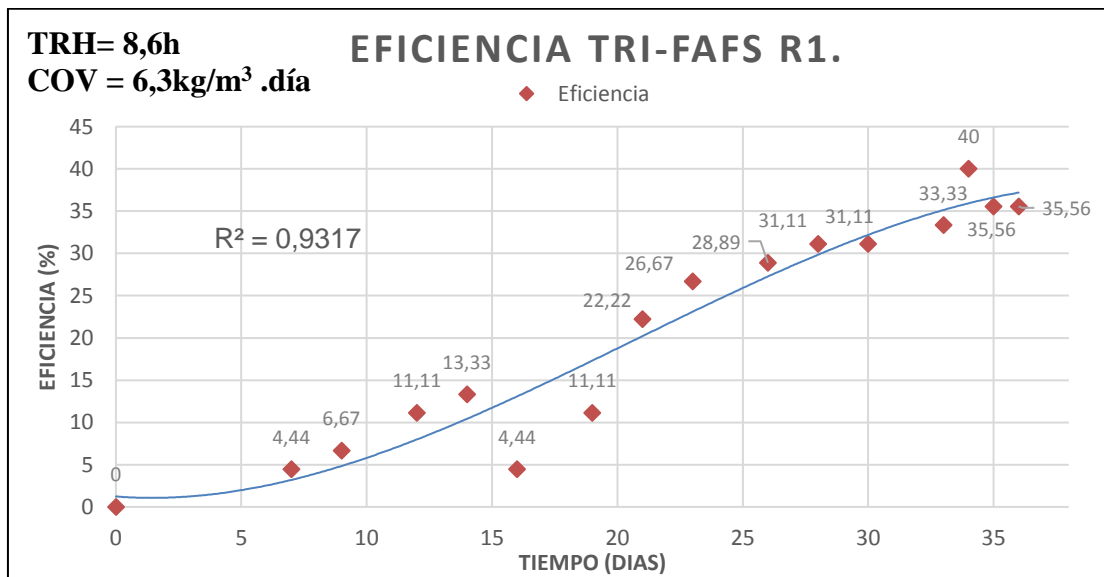
En esta tabla podemos observar que la eficiencia máxima alcanzada por este reactor fue de 40%, seguida de esta vemos que la eficiencia bajo en un 4.44%, manteniéndose en valor; esta



baja eficiencia se presentó debido al bajo TRH= 8.6h y la alta carga orgánica volumétrica con la que opero.

Para observar mejor los datos obtenidos, se presenta la curva de la eficiencia Vs el tiempo. Donde se puede apreciar la dificultad que tuvo el reactor para alcanzar condiciones estables debido a que a altas cargas no alcanzan los microorganismos encargados de llevar a cabo la digestión a asimilar y degradar la concentración de materia orgánica presente en el afluente.

Gráfica 1 *Eficiencia VS Tiempo. R1*



### ***Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R2***

#### **Parámetros operacionales:**

Q = 5.8 ml/min

TRH = 11.8 horas

COV = 4.57 kg DQO/m<sup>3</sup>.día

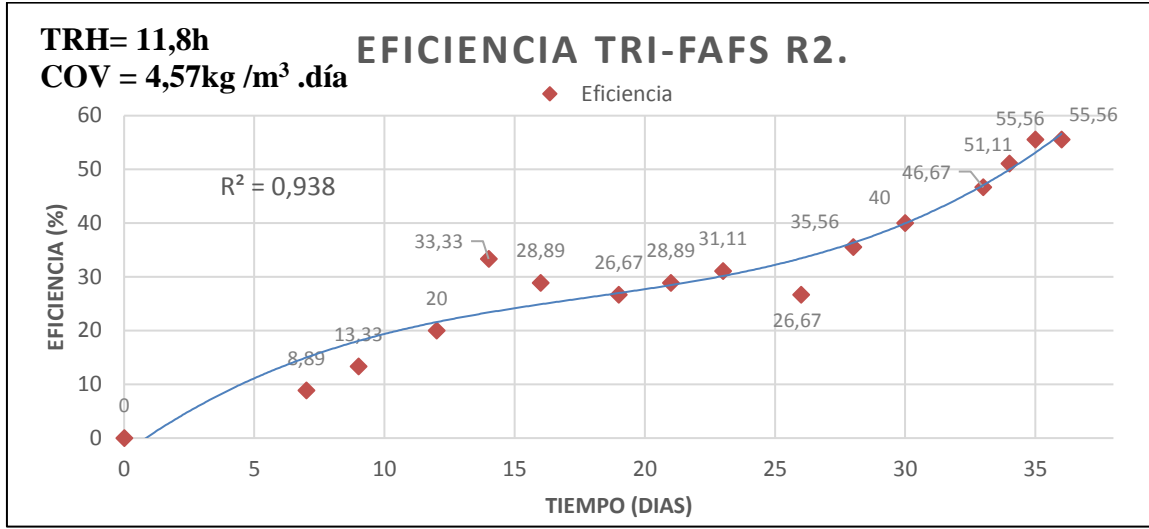
Tabla 13 *Afluentes, efluentes y eficiencias R2*

Filtro TRI-FAFS 2				
FECHA	PRUEBA	[DQO]i (mg /l)	[DQO]f (mg/l)	Eficiencia (%)
	0	0	0	0
30-ene-19	7	2250	2050	8,89
01-feb-19	9	2250	1950	13,33
04-feb-19	12	2250	1800	20,00
06-feb-19	14	2250	1500	33,33
08-feb-19	16	2250	1600	28,89
11-feb-19	19	2250	1650	26,67
13-feb-19	21	2250	1600	28,89
15-feb-19	23	2250	1550	31,11
18-feb-19	26	2250	1650	26,67
20-feb-19	28	2250	1450	35,56
22-feb-19	30	2250	1350	40,00
25-feb-19	33	2250	1200	46,67
26-feb-19	34	2250	1100	51,11
27-feb-19	35	2250	1000	55,56
28-feb-19	36	2250	1000	55,56

Ahora para el filtro anaerobio de fases separadas numero 2 el cual trabajo con un TRH= 11.8 h, vemos que la máxima eficiencia obtenida fue de 55.56%. A pesar de que aumento su eficiencia en términos de degradación de materia orgánica, debido a la COV que sigue estando en un rango alto (4.57 kg DQO/m<sup>3</sup>.día), no logro arrojar los resultados esperados para este tipo de reactores.

En la siguiente grafica se muestra la curva de eficiencias obtenidas VS el tiempo, donde podemos ver nuevamente que se dificulta la asimilación de la carga trabajada por parte de los microorganismos.

Gráfica 2 Eficiencia VS Tiempo. R2



**Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R3**

**Parámetros operacionales:**

Q = 4 ml/min

TRH = 17.12 horas

COV = 3.15 kg DQO/m³.día

Tabla 14 Afluentes, efluentes y eficiencias R3

Filtro TRI-FAFS 3				
FECHA	PRUEBA	[DQO]i (mg/l)	[DQO]f (mg/l)	Eficiencia (%)
	0	0	0	0
30-ene-19	7	2250	1950	13,33
01-feb-19	9	2250	1800	20,00
04-feb-19	12	2250	1600	28,89
06-feb-19	14	2250	1550	31,11
08-feb-19	16	2250	1450	35,56
11-feb-19	19	2250	1250	44,44
13-feb-19	21	2250	1150	48,89

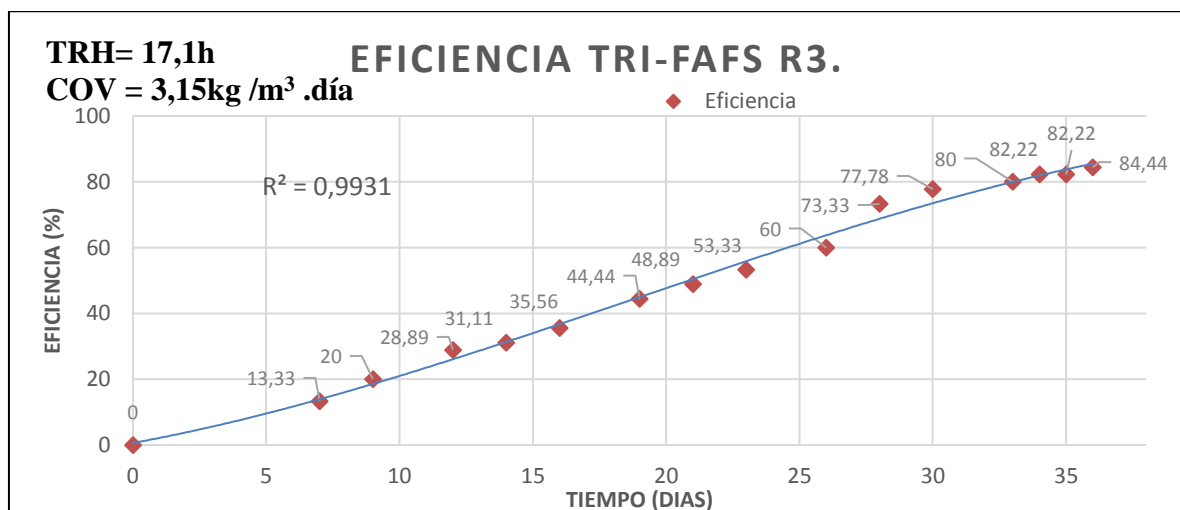
15-feb-19	23	2250	1050	53,33
18-feb-19	26	2250	900	60,00
20-feb-19	28	2250	600	73,33
22-feb-19	30	2250	500	77,78
25-feb-19	33	2250	450	80,00
26-feb-19	34	2250	400	82,22
27-feb-19	35	2250	400	82,22
28-feb-19	36	2250	350	84,44

En el caso del filtro anaerobio número tres (3) el cual para su operación se utilizó un TRH=17.1 h, podemos ver un aumento significativo en la máxima eficiencia alcanzada al remover la materia orgánica presente en el sustrato (lixiviado) la cual fue de 84.44%.

En este reactor se operó bajo una COV media (3.15 kg DQO/m<sup>3</sup>.día) y al prolongarse el TRH en 5.3 horas más que en el reactor dos (2), vemos que este logra alcanzar una buena asimilación de la materia orgánica introducida por unidad de volumen, en donde los microorganismos presentes en el procesos degradan de manera eficiente el sustrato de alimentación.

En la gráfica 3 se muestra la curva de eficiencia, donde se aprecia el aumento constante que se tuvo en la eficiencia a lo largo del periodo de operación del reactor hasta llegar a una remoción constante o condición estable.

Gráfica 3 Eficiencia VS Tiempo. R3



**Filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS – R4**

**Parámetros operacionales:**

Q = 3.1 ml/min

TRH = 22 horas

COV = 2.44 kg DQO/m<sup>3</sup>.día

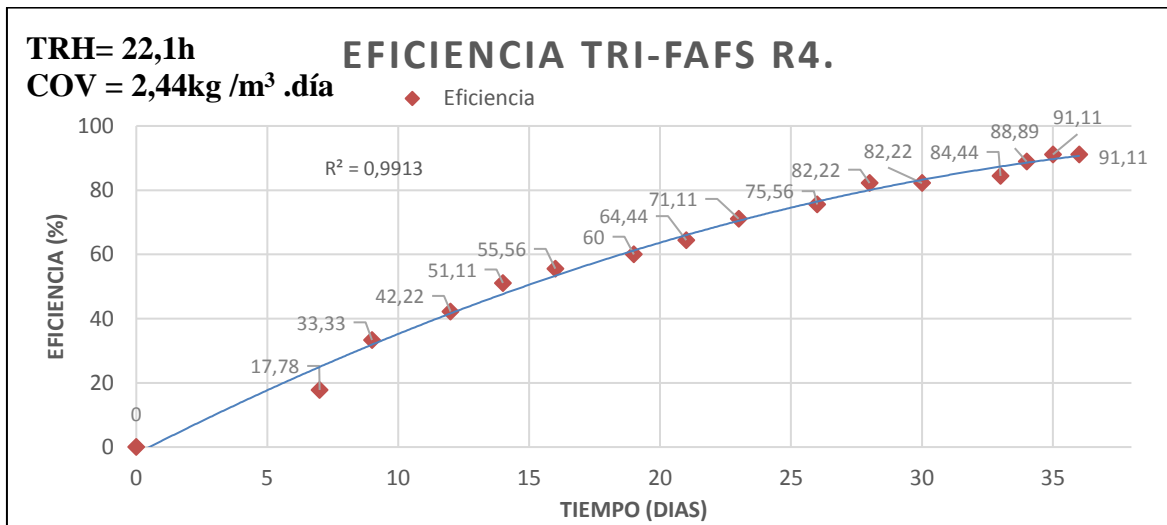
*Tabla 15 Afluentes, efluentes y eficiencias R4*

Filtro TRI-FAFS 4				
FECHA	PRUEBA	[DQO]i (mg /l)	[DQO]f (mg/l)	Eficiencia (%)
	0	0	0	0
30-ene-19	7	2250	1850	17,78
01-feb-19	9	2250	1500	33,33
04-feb-19	12	2250	1300	42,22
06-feb-19	14	2250	1100	51,11
08-feb-19	16	2250	1000	55,56
11-feb-19	19	2250	900	60,00
13-feb-19	21	2250	800	64,44
15-feb-19	23	2250	650	71,11
18-feb-19	26	2250	550	75,56
20-feb-19	28	2250	400	82,22
22-feb-19	30	2250	400	82,22
25-feb-19	33	2250	350	84,44
26-feb-19	34	2250	250	88,89
27-feb-19	35	2250	200	91,11
28-feb-19	36	2250	200	91,11

El reactor número cuatro (4) se operó ya como se dijo anteriormente con un TRH= 22.1 horas y una carga baja, a comparación de las demás usadas, COV= 2.44 kg DQO/m<sup>3</sup>.día, obteniéndose un 91.11% de eficiencia máxima, encontrando así la mayor degradabilidad de la materia orgánica presente en el lixiviado

En la gráfica 4 podemos ver el comportamiento de las eficiencias obtenidas en función del periodo de operación del reactor donde vemos que son las más estables con respecto a las eficiencias máxima obtenidas en los demás reactores, perfilándose, así como el filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS) con TRH óptimo.

Gráfica 4 Eficiencia VS Tiempo. R4



### ***Variación de pH del afluente respecto al efluente de los TRI-FAFS***

En la siguiente tabla podemos observar los valores del potencial de hidrogeno pH obtenidos tanto en el afluente como en el efluente de cada filtro anaerobio.

En los datos obtenidos en la medición de pH tanto del lixiviado crudo como del lixiviado efluente podemos determinar que el rango en que se encuentra este sustrato tiende a ser condiciones básicas lo que dificulta el proceso de biodegradación de la materia orgánica; Según autores como: (Kondusamy & Kalamdhad, 2014) y (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005), el

pH es un parámetro de gran importancia debido a que dependiendo de su rango este afecta la digestión anaerobia y eficiencia del sistema donde puede mejorar o inhibir el desempeño de los grupos bacterianos que intervienen el proceso. El pH óptimo oscila entre 6,6 y 7,6.

“El bajo pH a su vez puede interferir con el funcionamiento de numerosas tecnologías que se proponen, por ejemplo, la volatilización del amoníaco, para la cual se requieren pH básicos, o con algunos procesos biológicos como la nitrificación, o químicos como la oxidación del hierro” (Morales, 2007).

*Tabla 16 pH en el afluente y efluente de los cuatro TRI-FAFS*

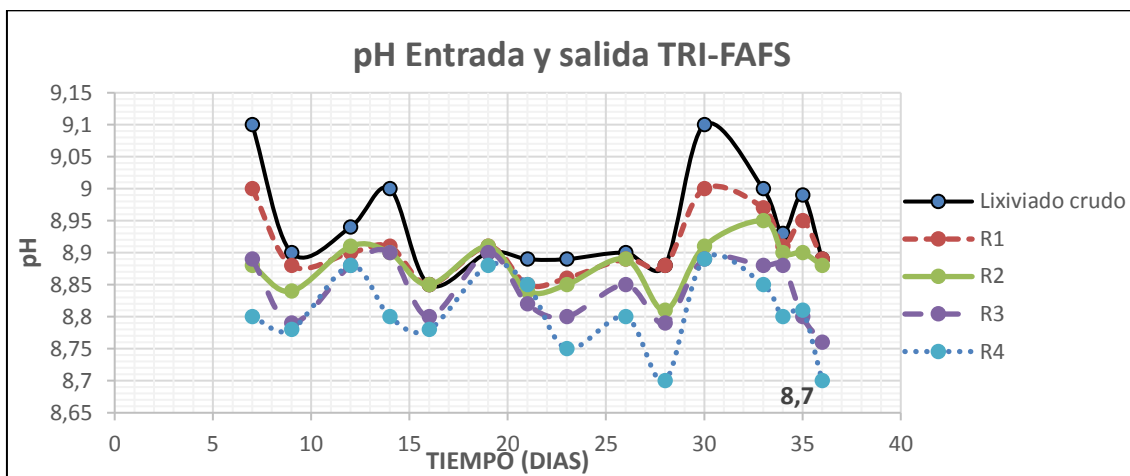
pH						
FECHA	DIAS	LIXIVIADO CRUDO	R1	R2	R3	R4
30-ene-19	7	9,10	9,00	8,88	8,89	8,80
01-feb-19	9	8,90	8,88	8,84	8,79	8,78
04-feb-19	12	8,94	8,90	8,91	8,88	8,88
06-feb-19	14	9,00	8,91	8,90	8,90	8,80
08-feb-19	16	8,85	8,85	8,85	8,80	8,78
11-feb-19	19	8,90	8,91	8,91	8,90	8,88
13-feb-19	21	8,89	8,85	8,84	8,82	8,85
15-feb-19	23	8,89	8,86	8,85	8,80	8,75
18-feb-19	26	8,90	8,89	8,89	8,85	8,80
20-feb-19	28	8,88	8,88	8,81	8,79	8,70
22-feb-19	30	9,10	9,00	8,91	8,89	8,89
25-feb-19	33	9,00	8,97	8,95	8,88	8,85
26-feb-19	34	8,93	8,91	8,90	8,88	8,80
27-feb-19	35	8,99	8,95	8,90	8,80	8,81
28-feb-19	36	8,89	8,89	8,88	8,76	8,70

También se aprecia que en el transcurso del lixiviado por cada reactor el pH presenta una leve disminución atribuyéndose este hecho a las bacterias fermentativas que se presentan en las primeras fases de la digestión anaerobia (Hidrolisis y acidogénesis), pero debido los altos

valores, donde en el afluente el pH mínimo encontrado fue de 8.85, este no logra alcanzar el intervalo óptimo para su operación según los autores ya citados.

En la gráfica 5 podemos observar más fácilmente esta variación del pH en el afluente y en el efluente de cada filtro anaerobio TRI-FAFS, vemos que en el reactor cuatro (4), operado con un TRH igual a 22.1 horas, es el que se obtiene una disminución más significativa del pH en comparación de los demás reactores, este coincide con la máxima eficiencia obtenida entre los cuatro reactores, obtenida con este mismo reactor.

Gráfica 5. *pH vs tiempo*



### ***Comparación del rendimiento de degradación de los cuatro TRI-FAFS y determinación del óptimo***

Cada uno de los reactores se alimentó con una concentración constante igual a 2250 mg DQO/l, a una temperatura constante de  $34^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , variando en la operación el TRH en cada filtro anaerobio R1 = 8.6 horas, R2= 11.8 horas, R3=17.1 horas, R4= 22.1 horas, determinando



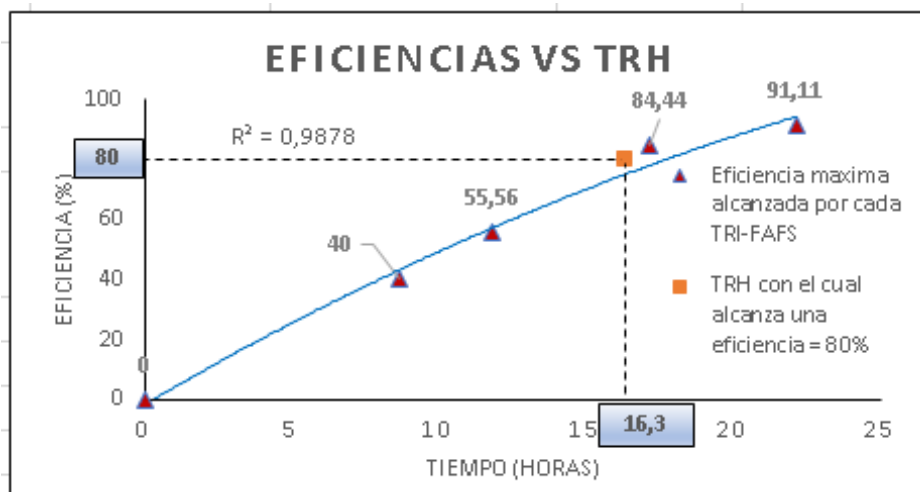
así el TRH óptimo para la operación el cual fue con el cual se alcanza una máxima eficiencia en términos de remoción de materia orgánica ( ver tabla 16)

Tabla 17 Eficiencia máxima Vs Tiempo de retención hidráulica

Eficiencias Vs TRH		
REACTOR	TRH	EFICIENCIAS
R1	8,6	40
R2	11,8	55,56
R3	17,1	84,44
R4	22,1	<u>91,11</u>

Finalmente se determinó y se tomó el reactor de filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS) número cuatro R4, como el óptimo para la operación con TRH= 22.1 horas y COV= 2.44 kg DQO/m<sup>3</sup>.día. Donde se puede analizar que, a mayor TRH en los reactores, mayores serán las eficiencias del sistema.

Gráfica 6 Eficiencia máxima Vs Tiempo de retención hidráulica



Se realizó una interpolación para determinar cuál sería el TRH en el cual se obtuviera una eficiencia igual al 80%, el cual nos arrojó que sería a las 16.3 horas; mostrando así que el sistema es eficiente para la degradación de materia orgánica con TRH mayores a 16 horas y confirmando las investigaciones realizadas anteriormente por M.Sc. Julio Isaac Maldonado.

### **Determinación de las Cinéticas de Reacción Mediante Análisis Microbiológico**

Esta etapa de la investigación se realizó con la dirección de la Microbióloga Angela Cajiao y su semillero de investigación SIMBIO en el laboratorio de microbiología GIMBIO.

Todo el análisis microbiológico se realizó con el filtro anaerobio de flujo ascendente (TRI-FAFS) - R4, el cual fue el que nos arrojó la mayor eficiencia de degradación.

### **Crecimiento bacteriano para conteo y aislamiento.**

Como se dijo anteriormente fue necesario realizar un medio modificado enriquecido (con lixiviado) para el crecimiento de la biomasa muestreada de cada fase, con el objetivo de darle adecuadas condiciones para su reproducción y desarrollo

Las siembras se llevaron a incubación con una temperatura de 30°C por aproximadamente una semana y cinco días momento en el que se pudo apreciar el crecimiento y determinar las características presentadas por los microorganismos reproducidos.

Las características físicas que se lograron apreciar en el crecimiento de cada fase son las siguientes:

### **Fase 1**

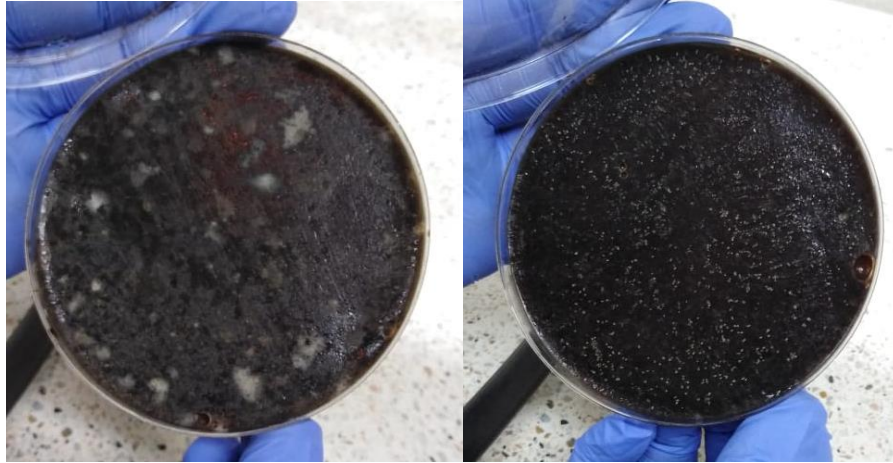
- a.** Colonias beige, irregulares, opacas y pequeñas
- b.** Colonias translucidas, unas redondas convexas mucoides y otras con borde irregular, brillantes
- c.** Colonias blancas, opacas, irregulares; colonias beige irregulares y colonias translucidas irregulares



**Figura 12.** Crecimiento fase 1

### **Fase 2**

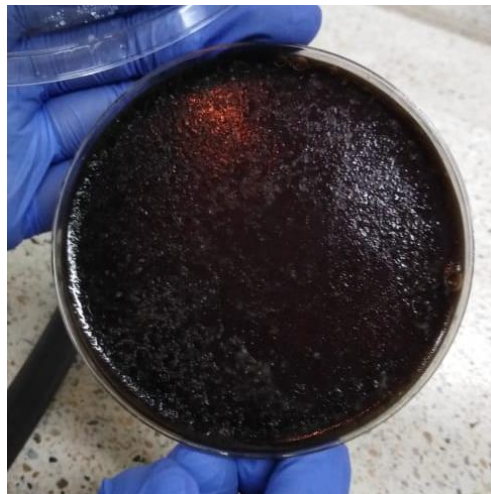
- a.** Colonias pequeñas irregulares, beige y opacas
- b.** Colonias pequeñas irregulares, beige y opacas
- c.** Colonias blancas aterciopeladas, grandes y cremosas; colonias marrones irregulares pequeñas (presuntivo hongo).



**Figura 13.** Crecimiento fase 2

### **Fase 3**

- a.** Colonias brillantes, color gris, irregulares presunto hongo o levadura
- b.** Colonias beige irregulares y colonias translucidas brillantes
- c.** Colonias beige, brillantes y pequeñas; colonias translucidas irregulares



**Figura 14.** Crecimiento fase 3

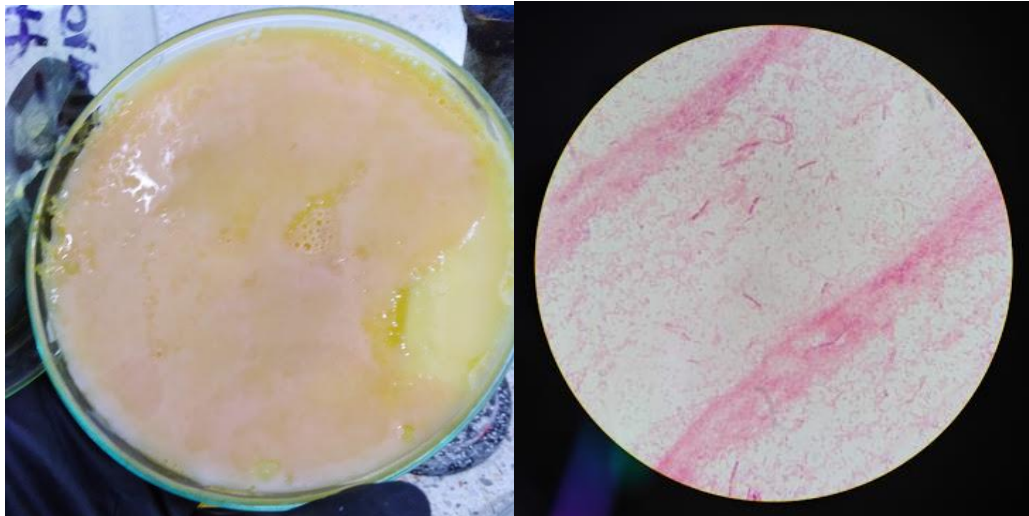
En todas las cajas se presentó un crecimiento masivo de microorganismos como se evidencia en las figuras anteriores, por lo que se hizo imposible realizar un conteo de unidades formadoras de colonia, tomando, así como valor estandarizado que el crecimiento obtenido es mayor a 1600 UFC/ml (incontable), por conteo en placa.

### *Aislamiento de hidrolíticas-acidogénicas en agar selectivo*

De las colonias que se identificaron en el medio modificado, se tomó una muestra de las colonias por característica físicas, de las descritas anteriormente, con un asa redonda se sembró por aislamiento en agar yema de huevo, agar leche y EMB, para evaluar la presencia de bacterias proteolíticas, lipolíticas y enterobacterias respectivamente. A partir de las colonias aisladas en cada agar se realizó identificación microscopia mediante tinción de Gram.

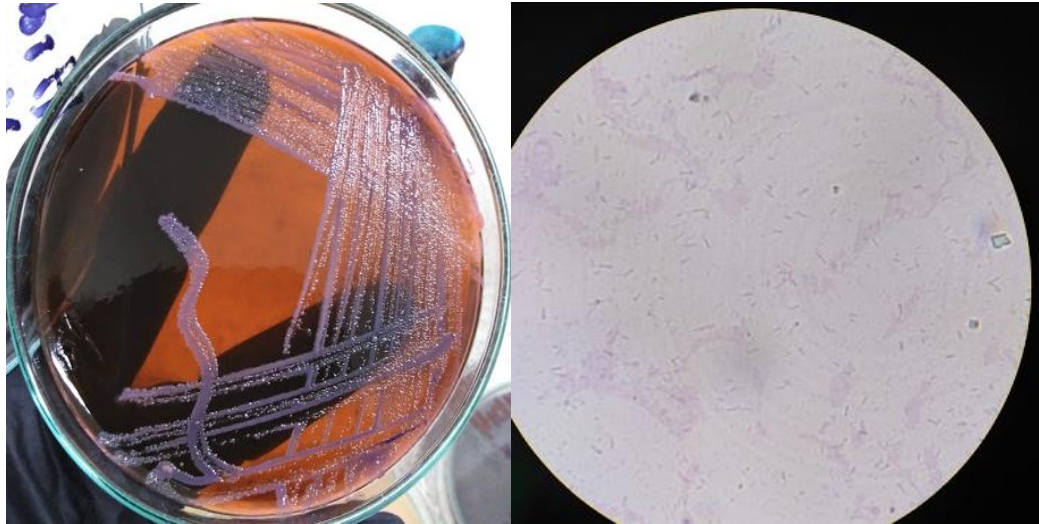
Donde se logró identificar colonias con las siguientes características:

- Textura mucoide, grande, de tonalidad rosada, la cual es representativa de la especie klebsiella y son gran negativas, al realizar la identificación microscópica por tinción de Gram, se pudo confirmar que esta colonia si es gran negativa por su tinción color rojo



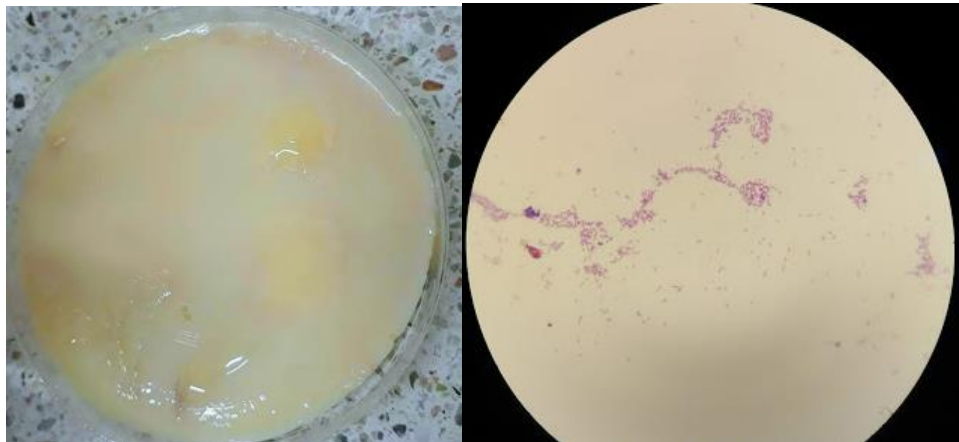
**Figura 15.** Agar yema de huevo, Klebsiella, Pseudomonas, gram negativa.

- Las fermentadoras débiles incluyendo Klebsiella, Enterobacter y Serratia producen colonias purpuras y translucidas, en agar EMB



**Figura 16.** Agar EMB, Klebsiella, Enterobacter, Serratia, gram negativas

- Agar leche presenta Bacillus gram positivos por su tinción morada



**Figura 17.** Agar leche, Bacillus gram positivos.

Teniendo en cuenta las características y los cultivos que se presentaron en los medios selectivos para la fase 1 del reactor, sabemos que efectivamente tenemos bacterias del tipo proteolíticas, lipolíticas, del tipo descarboxilasas, amilasas y fermentadoras; de géneros como Klebsiella, Enterobacter, Pseudomonas, entre otras. Y las posibles especies que se pueden encontrar por sus características, son los presentados a continuación;

Para la determinación de estos géneros se realizó una revisión bibliográfica en las bases de datos *Enzyme Expsy*, *BacDive (The Bacterial Diversity Metadatabase)* y en el libro *Diagnostico microbiológico: texto y atlas color* (Koneman , y otros, 1997).

Tabla 18 Posibles especies en la fase 1

FASE 1		
GENERO	CARACTERISTICAS	POSIBLES ESPECIES
<b>Klebsiella</b>	Familia Enterobacteriaceae Proteobacterias Colonias color rosa, purpura. Gram-negativas Anaerobias facultativas Presentan crecimiento 30°C Fermentadora débil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• K. ozaenae: Fermentadoras</li> <li>• K. rhinoscleromatis: Fermentadoras</li> <li>• K. planticola: Fermentadoras</li> <li>• K. oxytoca: Lisina- descarboxilasa +</li> </ul>
<b>Pseudomonas</b>	Son proteobacterias Basilos gran negativos Temperatura optima de crecimiento 30°C Algunas especies son lecitinasa positiva Oxidán azucares como la glucosa como fuente de energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pseudomonas aeruginosa</li> <li>• Pseudomonas fluorescens (no crece bajo pH acidos)</li> <li>• P cepacia o Burkholderia cepacia</li> <li>• P maltophilia: lisina descarboxilasa + Lipasa +</li> <li>• Pseudomonas alcaligenes</li> <li>• Pseudomonas pseudoalcaligenes</li> </ul>
<b>Enterobacteria</b> <b>s</b>	Son proteobacterias Colonias color purpura Gram negativas Facultativamente anaeróbicas Son fermentadores de carbohidratos en condiciones anaeróbicas con o sin la producción de gas La temperatura óptima de crecimiento entre 22 °C y 37 °C.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enterobacter aerogenes: fermentador de sacarosa, desacarboxila lisina</li> <li>• E cloacae: fermentador de sacarosa,</li> <li>• E gergoviae: fermentador de sacarosa, desacarboxila lisina y ureasa positiva</li> <li>• E sokazakii: fermentador de sacarosa</li> </ul>
<b>Proteus</b>	Colonias transparentes Gram negativas Facultativamente anaeróbico Fermentadoras débiles Temperatura de crecimiento 30°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• P myxofaciens: fermentador de maltosa</li> <li>• P mirabilis: fermentador de xilosa</li> <li>• P penneri y p vulgaris: fermentador de xilosa y maltosa</li> </ul>



<b>Salmonella</b>	Proteobacterias Familia Enterobacteriaceae Bacilos gramnegativos Anaerobios facultativos Temperatura de crecimiento 30°C Colonias transparentes No fermentadoras Decarboxilasa positivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salmonella entérica subespecie entérica</li> <li>• S. Salamae</li> <li>• S. Arizonae</li> <li>• S. Diarizonae</li> <li>• S. Houtenae</li> </ul>
<b>Serratia</b>	Bacteria Gram negativa Anaerobio facultativo, Familia Enterobacteriaceae. Lipolítica: lipasa positiva Temperatura de crecimiento 30°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S ficaria</li> <li>• S marcescens</li> <li>• S liquefaciens</li> <li>• Serratia sp.</li> </ul>
<b>Acinetobacter</b>	Proteobacterias Son bacilos gran negativos No fermentadoras Facultativas utilizan el nitrógeno y el oxígeno de los carbohidratos como fuente de energía Temperatura de crecimiento 30°C Lecitinasa positiva, Lipasas positivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acinetobacter baumannii</li> <li>• Acinetobacter sp.</li> <li>• Acinetobacter calcoaceticus</li> <li>• Acinetobacter baylyi</li> </ul>
<b>Bacillus</b>	Temperatura de crecimiento 30°C Anaerobios facultativos Gram positivos Lecitinasa positiva Lipasa positiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B. megaterium</li> <li>• B. subtilis</li> <li>• B. cereus</li> <li>• B. thuringiensis</li> <li>• B. licheniformis</li> <li>• B. pumilus</li> </ul>

### *Aislamiento de acetogénicas y metanogénicas en agar selectivo*

Se realizó siembra de la fase 2 y fase 3 en agar selectivo para acetogénicas y metanogénicas respectivamente. Estos tipos de agar son especiales para este tipo de microorganismos, por lo tanto, si hay presencia de crecimiento de colonias bacterianas, solo pueden ser de tipo acetogénicas y metanogénicas, pues el medio es adecuado para estos tipos y otros grupos de microorganismos no podrían crecer allí.



En las figuras 18 y 19, podemos observar que efectivamente se presentó crecimiento microbiológico. Por lo tanto y como se dijo anteriormente efectivamente hay presencia de microorganismos acetogénicos y metanogénicos, y posiblemente se encuentren los siguientes géneros y especies de bacterias en estas fases.



**Figura 18.** Agar para acetogénicas, crecimiento de colonias acetogénicas.



**Figura 19.** Agar para metanogénicas, crecimiento de colonias translucidas metanogénicas

Por revisión bibliográfica en las bases de datos anteriormente nombradas y por autores como: (Corrales , Antolinez , Bohorquez , & Corredor , 2015) y (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I., 2005), tenemos los siguientes:

Tabla 19 Posibles especies en la fase 2

FASE 2		
GENERO	CARACTERISTICAS	POSIBLES ESPECIES
<b>Peptococcus</b>	Convierten los ácidos grasos volátiles se convierten en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Anaerobias estrictas	Peptococcus niger
<b>Clostridium</b>	Temperatura de crecimiento desde 30- 37°c Gram-positive	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clostridium aceticum</li> <li>• Clostridium formicoaceticum</li> </ul>
Acetobacterium	Anaerobias Grampositivas Pertenece a la familia Eubacteriaceae. La mayoría de las especies reportadas en este género son homoacetógenos Temperatura de crecimiento desde 30°C	Acetobacterium woodii

Tabla 20 Posibles especies en la fase 3

FASE 3		
GENERO	CARACTERISTICAS	POSIBLES ESPECIES
<b>Methanobacterium</b>	Pertenece a las arqueas, quienes obtienen energía mediante la producción de gas natural, el metano (CH <sub>4</sub> ). Anaerobias estrictas Temperaturas de crecimiento de 30-37°C Algunos miembros de este género utilizan formiato para producir metano; otros se basan únicamente en la reducción de dióxido de carbono con hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methanobacterium sp</li> <li>• Methanococcus</li> <li>• Methanospirillum</li> <li>• Methanobrevibacter</li> </ul>

## Cinética de crecimiento bacteriano

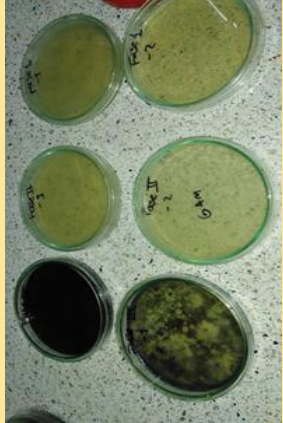
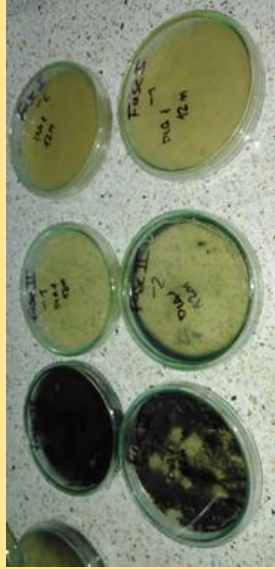
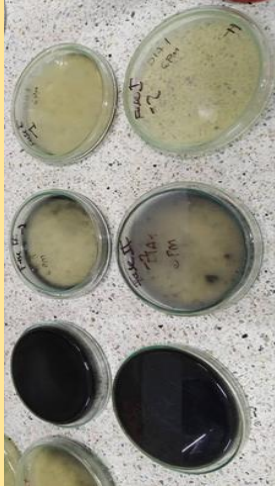
Se realizó la toma de muestras por un periodo de 48 horas, con intervalos de tiempo de seis (6) horas, recolectando en total tres (3) muestras diarias. Se realizó el cultivo en medio selectivo SPS, realizando la siembra con dos diluciones para cada una de las muestras.

Para el tratamiento de las muestras, se tomó 10 ml de muestra de cada fase del reactor y se llevó a dilución hasta  $10^{-2}$ , posteriormente se realizó siembra en medio SPS de cada dilución y se incubó por 48 horas a  $30^{\circ}\text{C}$ , en total anaerobiosis, utilizando el equipo *MICROBIOLOGY ANAEROCULT<sup>R</sup> A*, esto se repitió a las 0, 6, 12, 24, 30 y 36 horas de proceso del reactor, pasado el tiempo de incubación se realizó conteo de colonias para cada fase.

Posteriormente se realizó un monitoreo de las características físicas que se pueden apreciar en el crecimiento en cajas de Petri y un conteo estimado de las unidades formadoras de colonia totales y para cada descripción de microorganismos, para elaborar una curva de crecimiento de cinética de los microorganismos presentes en cada fase. Dichos datos se muestran en las siguientes tablas:

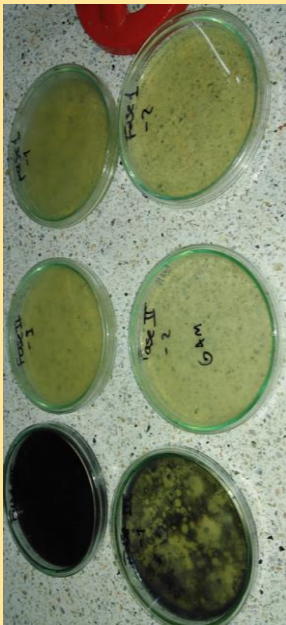
Tabla 21 *Conteo por descripción específica DIA 1*

FASE	DILUCIÓN <sup>-1</sup>		DILUCIÓN <sup>-2</sup>		ANEXO
	DESCRIPCION	CONTEO UFC/ml	DESCRIPCION	CONTEO UFC/ml	FOTOGRAFICO
DIA 1 - 06:00 AM					
FASE I	Verde de tamaño pequeño y borde redondo	Mayor a 1600	Blanca de tamaño pequeño y borde redondo	412	
	Translucida de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Translucida de tamaño grande y borde irregular	204	

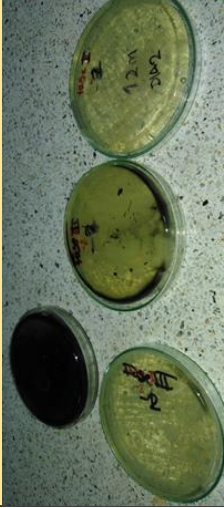
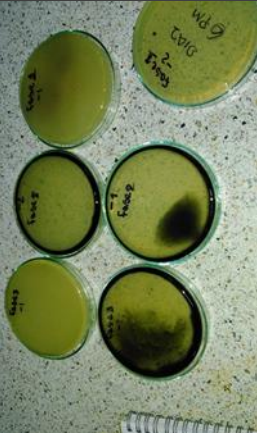
FASE 2	Beige de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Beige de tamaño grande y borde irregular	236	
FASE 3	Negras de tamaños variados y borde irregular	Mayor a 1600	Negras de tamaños variados y borde irregular	51	
<b>DIA 1 - 12:00 M</b>					
FASE 1	Blanca brillante de borde redondo	Mayor a 1600	Negras de tamaños variados y borde irregular	5	
			Blanca brillante de borde redondo	Mayor a 1600	
			Incolora de tamaño pequeño	Mayor a 1600	
FASE 2	Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	Mayor a 1600	Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	57	
	Negra de tamaño redondo y borde redondo	2	Negra de tamaño redondo y borde redondo	61	
FASE 3	Negra de tamaño redondo y borde redondo	Mayor a 1600	Negra de tamaño redondo y borde redondo	328	
			Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	140	
<b>DIA 1 - 6:00 PM</b>					
FASE 1	Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	Mayor a 1600	Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	42	
	Negra de tamaño grande y borde redondo	1	Translucida de tamaño pequeño y borde redondo	28	
	Presencia en todo el borde de color negro	Mayor a 1600			
FASE 2	Negra de tamaño grande y borde redondo	82	Negra de tamaño grande y borde redondo	44	
	Translucida brillante de borde irregular	Mayor a 1600	Blanca brillante, tamaño pequeño y de borde redondo	1	

FASE 3	Negra de tamaño grande y borde redondo	Mayor a 1600	Negra de tamaño grande y borde redondo	96	
--------	--	--------------	--	----	--

Tabla 22 *Conteo por descripción específica DIA 2*

FASE	DILUCION <sup>-1</sup>		DILUCION <sup>-2</sup>		ANEXO FOTOGRAFICO
	DESCRIPCION	CONTEO UFC/ml	DESCRIPCION	CONTEO UFC	
DIA 2 - 06:00 AM					
FASE 1	Translucida de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Translucida de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	
			Blanca de tamaño pequeño y borde redondo	4	
FASE 2	Translucida de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Translucida de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	
	Blanca brillante de borde redondo liso y textura cremosa	12	Negras de tamaños variados y borde irregular	Mayor a 1600	
	Presencia en todo el borde de microorganismo color negro	70			
FASE 3	Beige de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Beige de tamaño grande y borde irregular	12	
	Incolora de tamaño pequeño y borde liso	Mayor a 1600	Incolora de tamaño pequeño	Mayor a 1600	
	Negra de tamaño variado y borde irregular	19	Negra de tamaño variado y borde irregular	8	
	Blanca de tamaño pequeño y borde irregular	Mayor a 1600			
	Presuntivo para hongo	1			
	Presuntivo para levadura	2			
DIA 2 - 12:00M					
FASE 1	_____	_____	Blanca brillante de borde redondo	11	



			Beige de tamaño grande y borde irregular	No colonias aisladas	
FASE 2	_____	_____	Translucida de tamaño grande y borde irregular	No colonias aisladas	
			Negra de tamaño grande y borde redondo	25	
FASE 3	Negra de tamaño grande y borde redondo	Mayor a 1600	Negra de tamaño grande y borde redondo	5	
			Blanca de borde irregular	23	
<b>DIA 2 - 06:00 PM</b>					
FASE 1	Beige de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	Beige de tamaño grande y borde irregular	Mayor a 1600	
	Incolora de tamaño pequeño y borde liso	Mayor a 1600	Negra de tamaño grande y borde redondo	2	
FASE 2	Negra de tamaño grande y borde redondo	2	Negra de tamaño grande y borde redondo	1	
FASE 3	Blanca de tamaño pequeño y borde redondo	Mayor a 1600	Negra de tamaño grande y borde redondo	92	
			Beige de tamaño grande y borde irregular	1	

Al realizar este monitoreo y descripción de las características físicas que presentan los microorganismos cultivados, podemos observar la separación de tipos de microorganismos que se presentan cada fase, así como el crecimiento de bacterias sulfato reductoras SRB (por sus siglas en ingles), que se distinguen por su color negro debido a la formación de sulfuro de hierro por reducción del sulfito.

“El sulfito sódico presente en el medio es reducido a Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S) por la mayoría de los Clostridium spp. El Sulfuro de Hidrógeno reaccionará con el Citrato Férrico y

formará un precipitado, Sulfuro de Hierro, que le da el color negro a las colonias.” (Soria Melguizo, 2009)

Este tipo de bacterias SRB, son anaerobias estrictas, que emplean el sulfato como aceptor final de electrones en la degradación de la materia orgánica. Podemos encontrar diversas especies y géneros dentro de estas bacterias SRB, según diversas investigaciones algunas como: varias especies de Clostridium, del género Bacillus, algunas SRB mesófilas gramnegativas, Desulfobacter, Desulfomonas, Desulfovibrio que es común en ambientes acuáticos con abundante materia orgánica y suficientes niveles de sulfatos, entre otras. (Castro , Williams , & Ogram , 2000), (Doyle, O’Toole, & Cotter, 2018), (Instituto Valenciano de Microbiología , 2018).

Todo lo anterior es soporte para presuntivamente decir que algunos de estos géneros muy seguramente serán los que se encuentran presentes en estas fases del filtro anaerobio TRI-FAFS, como podemos observar en las tablas anteriores, su crecimiento se comienza a mostrar en poca cantidad en la fase 2 y en mayor cantidad en la fase 3 del proceso, gracias a sus condiciones de extrema anaerobiosis.

Tabla 23 *Conteo total DIA 1*

FASE	DILUCION <sup>-1</sup>	DILUCION <sup>-2</sup>
	CONTEO UFC/ml	CONTEO UFC/ml
<b>DIA 1 - 06:00 AM</b>		
FASE 1	Mayor a 1600	616
FASE 2	Mayor a 1600	236
FASE 3	420	51
<b>DIA 1 - 12:00 M</b>		
FASE 1	Mayor a 1600	684
FASE 2	Mayor a 1600	118
FASE 3	Mayor a 1600	468
<b>DIA 1 - 6:00 PM</b>		

FASE I	Mayor a 1600	700
FASE 2	Mayor a 1600	44
FASE 3	Mayor a 1600	96

Tabla 24 *Conteo total DIA 2*

FASE	DILUCION <sup>-1</sup>	DILUCION <sup>-2</sup>
	CONTEO UFC/ml	CONTEO UFC/ml
<b>DIA 2 - 06:00 AM</b>		
FASE I	Mayor a 1600	690
FASE 2	Mayor a 1600	330
FASE 3	Mayor a 1600	80
<b>DIA 2 - 12:00M</b>		
FASE 1	Mayor a 1600	710
FASE 2	Mayor a 1600	250
FASE 3	Mayor a 1600	28
<b>DIA 2 - 06:00 PM</b>		
FASE I	Mayor a 1600	Mayor a 1600
FASE 2	Mayor a 1600	103
FASE 3	Mayor a 1600	93

Pasado el tiempo de incubación se realizó conteo de colonias totales para cada fase, para elaborar una curva de crecimiento de cinética de los microorganismos presentes en cada fase. Los registros presentados son los observados en las tablas anteriores. Donde se puede notar el rápido aumento en el crecimiento de microorganismos de la primera fase, ya que estas bacterias según la teoría son las que presentan mayor velocidad de reproducción en periodos más cortos de tiempos, y también son las limitantes de todo el proceso, pues dependiendo de los productos que ellas generen al finalizar su metabolismo, es que se va a presentar el crecimiento de los microorganismos en las fases posteriores.



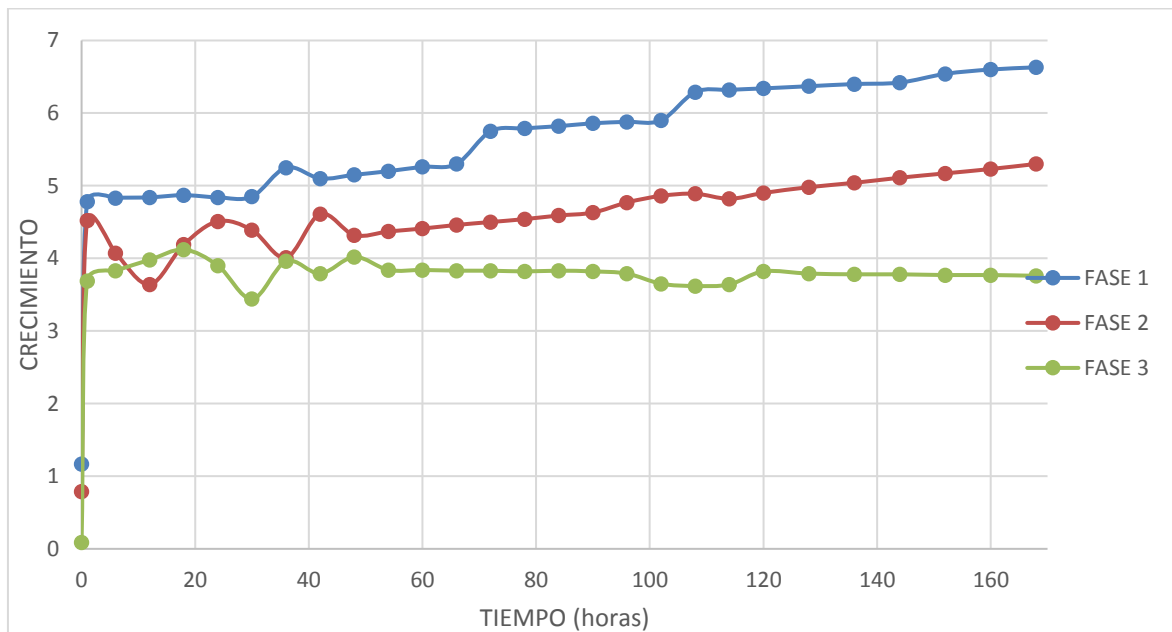
Para realizar la curva de crecimiento de cada grupo de bacterias que se están presentando y con el fin de observar cual fue el crecimiento que realizaron durante el proceso, se toma un dato inicial de poblaciones de microorganismos, el cual había sido sembrado en el instante en que se comenzó a operar, tal registro lo podemos observar en la siguiente tabla como el dato de la hora 0. Los datos siguientes, correspondientes al crecimiento poblacional, medidos durante los dos días en el momento en que ya el reactor se encontraba en estado estable, se presentan en la gráfica desde la hora 1, se hizo necesario realizar una extrapolación y tendencia hasta los 7 días, con el fin de dar un mejor análisis a el comportamiento que están presentando en el transcurso del tiempo. Los datos que se obtuvieron se muestran en la siguiente tabla con sus respectivos logaritmos en función del tiempo y su respectiva grafica

Tabla 25. *Crecimiento de microorganismos de cada fase por 7 días*

CINETICA DE CRECIMIENTO						
HORA	FASE 1		FASE 2		FASE 3	
	Crecimiento	Logaritmo	Crecimiento	Logaritmo	Crecimiento	Logaritmo
0	1,51E+01	1,17	6,28E+00	0,79	1,23E+00	0,089
1	6,03E+04	4,78	3,31E+04	4,52	4,90E+03	3,69
6	6,76E+04	4,83	1,17E+04	4,07	6,76E+03	3,83
12	6,92E+04	4,84	4,37E+03	3,64	9,55E+03	3,98
18	7,41E+04	4,87	1,55E+04	4,19	1,32E+04	4,12
24	6,92E+04	4,84	3,24E+04	4,51	7,94E+03	3,9
30	7,08E+04	4,85	2,45E+04	4,39	2,75E+03	3,44
36	1,78E+05	5,25	1,02E+04	4,01	9,12E+03	3,96
42	1,26E+05	5,1	4,07E+04	4,61	6,17E+03	3,79
48	1,41E+05	5,15	2,09E+04	4,32	1,05E+04	4,02
54	1,58E+05	5,2	2,34E+04	4,37	6,92E+03	3,84
60	1,82E+05	5,26	2,57E+04	4,41	6,92E+03	3,84
66	2,00E+05	5,3	2,88E+04	4,46	6,76E+03	3,83
72	5,62E+05	5,75	3,16E+04	4,5	6,76E+03	3,83
78	6,17E+05	5,79	3,47E+04	4,54	6,61E+03	3,82
84	6,61E+05	5,82	3,89E+04	4,59	6,76E+03	3,83
90	7,24E+05	5,86	4,27E+04	4,63	6,61E+03	3,82
96	7,59E+05	5,88	5,89E+04	4,77	6,17E+03	3,79
102	7,94E+05	5,9	7,24E+04	4,86	4,47E+03	3,65
108	1,95E+06	6,29	7,76E+04	4,89	4,17E+03	3,62

114	2,09E+06	6,32	6,61E+04	4,82	4,37E+03	3,64
120	2,19E+06	6,34	7,94E+04	4,9	6,61E+03	3,82
128	2,34E+06	6,37	9,55E+04	4,98	6,17E+03	3,79
136	2,51E+06	6,4	1,10E+05	5,04	6,03E+03	3,78
144	2,63E+06	6,42	1,29E+05	5,11	6,03E+03	3,78
152	3,47E+06	6,54	1,48E+05	5,17	5,89E+03	3,77
160	3,98E+06	6,6	1,70E+05	5,23	5,89E+03	3,77
168	4,27E+06	6,63	2,00E+05	5,3	5,75E+03	3,76

Gráfica 7 Curvas de crecimiento para cada fase Vs tiempo



Podemos observar que los grupos de microorganismos presentes en la fase 1 son los de mayor crecimiento, donde se presentan la etapa fermentativa de la digestión anaerobia (hidrolisis y acidogénesis), ya que según la teoría consultada son lo de máxima velocidad de reproducción en comparación de las demás fases.

Para las otras dos fases podemos apreciar en la gráfica que su crecimiento es inversamente proporcional, ya que los microorganismos de la fase 3 dependen de los productos del

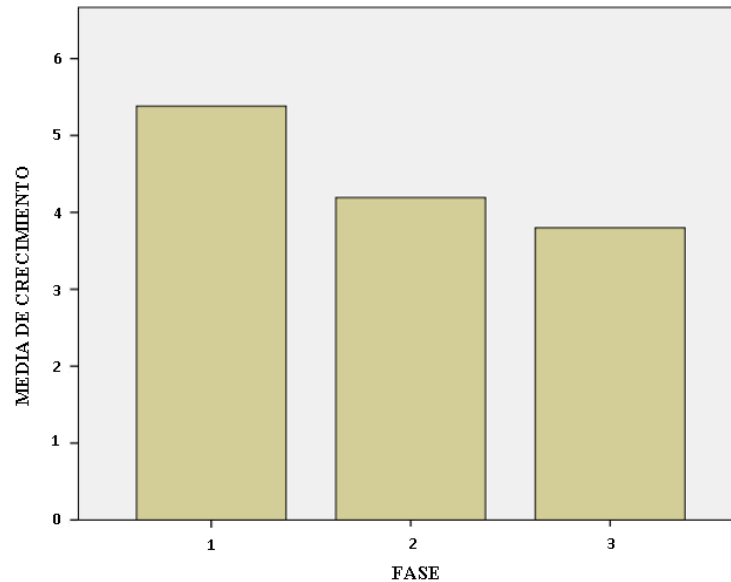
metabolismo de los de la fase 2. Por esto vemos en la curva que cuando la una crece, la otra presenta una disminución de su población y viceversa.

En las horas iniciales de los muestreos, se observa el comportamiento clave de la reproducción, donde se ven picos de subidas o bajadas de crecimiento para todas las fases, hasta llegar a un punto donde permanecen casi constantes, el cual es el comportamiento normal de una población de bacterias, ya que el crecimiento de unas va condicionado a el metabolismo de las anteriores.

Como ya se ha expresado anteriormente, el muestreo para cultivos de crecimiento se comenzó a tomar en el momento que el filtro anaerobio TRI-FAFS, ya se encontraba en condición estable de su sistema, es decir momento en el cual ya estaba establecida una población de microorganismos, por lo tanto no se puede apreciar en los datos obtenidos el crecimiento completo de las colonias, sino que al contrario, se observa una población casi constante, con aumentos o disminuciones poco significativas, también ocurre esto porque el sistema es de alimentación continua de sustrato. En los procesos continuos, se pretende que la etapa de crecimiento estacionario de las poblaciones se mantenga indefinidamente.

En el caso de que se hubiera realizado la toma de muestras desde el momento inicial en que el reactor comenzó a operar se vería el comportamiento real de los grupos de microorganismos en cada una de las fases, donde probablemente las primeras en presentar crecimiento serían las fermentativas de la fase 1 (hidrolíticas – acidogénicas), mientras las dos fases siguientes se mantendrían a la espera de los productos o desechos de ellas.

Gráfica 8 *Media de crecimiento microbiológico por fase*



En la siguiente grafica podemos ver la media de crecimiento de cada grupo de microorganismos, podemos observar que las de mayor crecimiento siempre serán las hidrolíticas por su rápida reproducción en un menor periodo de tiempo y las que presentan menor crecimiento son las de la fase 3 o fase metanogénica, pues son las más lentas en su reproducción.

Finalmente se utilizó la ecuación de Monod, tomada de (Capitulo VI. Cinética de la digestión anaerobia), para determinar el coeficiente de crecimiento  $K$  y el coeficiente de rendimiento  $Y$  de los microorganismos de cada fase.

### ***Ecuación de Monod***

$$\left(-\frac{dS}{dt}\right) = \frac{\mu_{max}}{Y_{x|s}} \cdot \left(\frac{S}{K_s + S}\right) * Xv$$

Donde:

$\mu_{\max}$  = Tiempo en que cada grupo de microorganismos se generan. O llamado g según algunos libros

$Y_{x|s}$  = Rendimiento presentado por cada grupo de microorganismos, relación biomasa-sustrato

S = concentración de sustrato (2250 mg/L).

$K_s$  = Es el cambio de sustrato a lo largo del tiempo. En el proceso no hubo cambio de concentración del sustrato por lo tanto  $K_s = S$

$X_v$  = Corresponde a el crecimiento de los microorganismos a lo largo del tiempo. (en logaritmo)

$dS/dt$  = El crecimiento presentado por cada fase a la largo del tiempo = K

Para la determinación del  $\mu_{\max}$  o tiempo de generación g se realizó mediante las siguiente s ecuaciones:

$$\mu_{\max} = g = \frac{t}{n}$$
$$n = \frac{\log(N) - \log(N_0)}{\log(2)}$$

Donde:

t = Tiempo en horas en que se mantuvo la operación del reactor hasta llegar a su estado estable. 36 días = 864 horas

n = Numero de generaciones para cada fase

N = Número final de células

$N_0$  = Numero inicial de células

Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 26 *Tiempo de generación por fase*

FASE 1			FASE 2			FASE 3		
n	t	g	n	t	g	n	t	g
18,14	864	47,64	14,98	864	57,67	12,19	864	70,85

Tabla 27 *Cálculos ecuación de Monod*

FASE 1			FASE 2			FASE 3		
dS/dt	Yx/s	$\mu_{max}/Yx/s$	dS/dt	Yx/s	$\mu_{max}/Yx/s$	dS/dt	Yx/s	$\mu_{max}/Yx/s$
5,36E+04	5,20E-04	9,16E+04	6,49E+04	3,51E-04	1,64E+05	7,97E+04	3,96E-05	1,79E+06
5,36E+04	2,12E-03	2,24E+04	6,49E+04	2,01E-03	2,87E+04	7,97E+04	1,64E-03	4,32E+04
5,36E+04	2,15E-03	2,22E+04	6,49E+04	1,81E-03	3,19E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,16E+04
5,36E+04	2,15E-03	2,21E+04	6,49E+04	1,62E-03	3,56E+04	7,97E+04	1,77E-03	4,01E+04
5,36E+04	2,16E-03	2,20E+04	6,49E+04	1,86E-03	3,10E+04	7,97E+04	1,83E-03	3,87E+04
5,36E+04	2,15E-03	2,21E+04	6,49E+04	2,00E-03	2,88E+04	7,97E+04	1,73E-03	4,09E+04
5,36E+04	2,16E-03	2,21E+04	6,49E+04	1,95E-03	2,96E+04	7,97E+04	1,53E-03	4,63E+04
5,36E+04	2,33E-03	2,04E+04	6,49E+04	1,78E-03	3,24E+04	7,97E+04	1,76E-03	4,03E+04
5,36E+04	2,27E-03	2,10E+04	6,49E+04	2,05E-03	2,81E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,21E+04
5,36E+04	2,29E-03	2,08E+04	6,49E+04	1,92E-03	3,00E+04	7,97E+04	1,79E-03	3,97E+04
5,36E+04	2,31E-03	2,06E+04	6,49E+04	1,94E-03	2,97E+04	7,97E+04	1,71E-03	4,15E+04
5,36E+04	2,34E-03	2,04E+04	6,49E+04	1,96E-03	2,94E+04	7,97E+04	1,71E-03	4,15E+04
5,36E+04	2,36E-03	2,02E+04	6,49E+04	1,98E-03	2,91E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,16E+04
5,36E+04	2,56E-03	1,86E+04	6,49E+04	2,00E-03	2,88E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,16E+04
5,36E+04	2,57E-03	1,85E+04	6,49E+04	2,02E-03	2,86E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,17E+04
5,36E+04	2,59E-03	1,84E+04	6,49E+04	2,04E-03	2,83E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,16E+04
5,36E+04	2,60E-03	1,83E+04	6,49E+04	2,06E-03	2,80E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,17E+04
5,36E+04	2,61E-03	1,82E+04	6,49E+04	2,12E-03	2,72E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,21E+04
5,36E+04	2,62E-03	1,82E+04	6,49E+04	2,16E-03	2,67E+04	7,97E+04	1,62E-03	4,37E+04
5,36E+04	2,80E-03	1,70E+04	6,49E+04	2,17E-03	2,65E+04	7,97E+04	1,61E-03	4,40E+04
5,36E+04	2,81E-03	1,70E+04	6,49E+04	2,14E-03	2,69E+04	7,97E+04	1,62E-03	4,38E+04
5,36E+04	2,82E-03	1,69E+04	6,49E+04	2,18E-03	2,65E+04	7,97E+04	1,70E-03	4,17E+04
5,36E+04	2,83E-03	1,68E+04	6,49E+04	2,21E-03	2,61E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,21E+04
5,36E+04	2,84E-03	1,67E+04	6,49E+04	2,24E-03	2,57E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,22E+04
5,36E+04	2,85E-03	1,67E+04	6,49E+04	2,27E-03	2,54E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,22E+04
5,36E+04	2,91E-03	1,64E+04	6,49E+04	2,30E-03	2,51E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,23E+04
5,36E+04	2,93E-03	1,62E+04	6,49E+04	2,32E-03	2,48E+04	7,97E+04	1,68E-03	4,23E+04
5,36E+04	2,95E-03	1,62E+04	6,49E+04	2,36E-03	2,45E+04	7,97E+04	1,67E-03	4,24E+04
Y medio	2,45E-03			1,99E-03			1,63E-03	

Cabe resaltar que los tiempos de generación son diferentes para cada especie y depende de diversos factores, como la velocidad de reproducción y crecimiento que tengan cada uno de ellos. El  $\mu_{max}$  que se presentó para cada grupo de bacterias según la fase fue el siguiente:

- FASE 1 = 47,64 horas
- FASE 2 = 57,67 horas
- FASE 3 = 70,85 horas.

Podemos observar que el tiempo mínimo se presenta en la fase 3, metanogénica, debido a que estos microorganismos son de metabolismo más lento que los de las etapas anteriores. El  $X_v$  es el logaritmo del crecimiento presentado por fases en la tabla 27.

Tabla 28 *Constantes por fase*

CONSTANTES PARA CADA FASE					
FASE 1		FASE 2		FASE 3	
K	Y	K	Y	K	Y
5,36E+04	2,45E-03	6,49E+04	1,99E-03	7,97E+04	1,63E-03

Podemos ver en la tabla anterior las constantes de crecimiento y rendimiento para cada una de las fases del filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS. En donde se presentó un crecimiento constante de los microorganismos para cada fase debido a que los muestreos se comenzaron a tomar cuando el reactor ya había alcanzado su condición estable de remoción de materia orgánica, es decir sus poblaciones de microorganismos ya se encontraban en gran cantidad y adaptación al sustrato.

## CONCLUSIONES

- El estiércol de cerdo utilizado como inóculo permitió un arranque y operación satisfactorio de los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS), gracias a su riqueza en cantidad y variedad de microorganismos indispensables para la digestión anaerobia, con lo que se pudo verificar la recomendación dada en la investigación de (Rodríguez Chona & Maldonado , Pamplona)
- Se logró establecer las características físico-químicas del lixiviado recolectado en el relleno sanitario “La cortada” de la ciudad de Pamplona, el cual se caracterizó como un lixiviado intermedio con índices de biodegradabilidad promedio igual a 0.4
- Se hace posible el tratamiento mediante procesos biológicos con filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS), para tratar los lixiviados provenientes del relleno sanitario “La cortada” de la ciudad de Pamplona, debido a la alta cantidad de materia orgánica presente.
- Se confirma que con la disposición de volúmenes de fase metanogénica (80%) y no metanogénica (20%), se logran obtener altas eficiencias en la remoción de la materia orgánica
- Se determinó secuencialmente la eficiencia de remoción de materia orgánica de cada reactor en función del TRH, por medio de la prueba de DQO, con la cual se logró establecer que la operación óptima para los filtros anaerobios (TRI-FAFS) es con TRH igual a 22 horas y COV bajas (2.44 kg DQO/m<sup>3</sup>. día).
- Observamos que el sistema anaerobio con filtros TRI-FAFS, es eficiente para tiempos de retención hidráulica mayores a 16 horas, confirmando los estudios realizados por el M.Sc



Julio Isaac Maldonado. Por tanto, mientras mayor es el TRH mayores son las eficiencias que puede alcanzar los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS).

- Cuando los filtros anaerobios de flujo ascendente separados en fases (TRI-FAFS), son operados con tiempos de retención hidráulica menores a 16 horas, no es posible lograr una estabilidad en el proceso debido a que no logra asimilar las altas cargas orgánicas volumétricas (COV) en tiempos tan cortos.
- En el interior del sistema el pH se trata de neutralizar, pero se dificulta una disminución significativa debido a su alto rango de alcalinidad
- Se logro tomar muestreos de biopelícula bacteriana en cada fase de los filtros, y con ellas hacer los respectivos cultivos en medios modificados, donde se garantizó la reproducción y crecimientos de microorganismos, como se pudo notar en el conteo inicial de las unidades formadoras de colonia, donde en todas dio mayor a 1600 UFC/ml.
- Se identificaron microorganismos sulfato reductores SRB, en mayor presencia en las fases 2 y 3 del filtro anaerobio TRI-FAFS, ya que estas son las fases anaerobias estrictas, presentando así condiciones aptas para la reproducción de este tipo de bacterias
- Se logro mostrar, que al aplicar esta separación en fases de los filtros anaerobios, efectivamente se está presentando una separación de las etapas de la digestión anaerobia, presentando microorganismos en la fase 1 (10%) hidrolíticos y acidogénicos, en la fase 2 (10%) acetogénicos y en la fase 3 (80%) metanogénicos.
- Se lograron aislar colonias de bacterias proteolíticas y lipolíticas de la primera fase del reactor, obteniéndose géneros tales como: Klebsiella, enterobacterias, Pseudomonas, Serratia, Acinetobacter y Bacillus

- Como resultado de los muestreos y replicaciones de microorganismos para la cinética de crecimiento, observamos que los microorganismos presentes mostraron un valor constante de colonias en función del tiempo, con pocas variaciones, debido a que el reactor ya había alcanzado las condiciones estables del proceso.
- Observamos la relación inversa en el crecimiento microbiano que presenta entre la fase 2 y 3 del reactor, ya que, los productos del metabolismo de la fase 2, son los condicionantes para el alimento y crecimiento de los microorganismos de la fase 3.
- Se identificaron como tiempos de generación de microorganismos para la fase 1, 2 y 3, de 47,64 horas, 57,67 horas y 70,85 horas, respectivamente.
- No fue posible evidenciar el comportamiento inicial en relación al crecimiento y reproducción de los grupos de microorganismos por fase, debido a que los muestreos se tomaron cuando el filtro anaerobio ya presentaba una adaptación y población estable de microorganismos
- Este sistema es digestión anaerobia es de alimentación constante a una misma concentración de sustrato, por lo tanto, no es posible evidenciar como tal una cinética de crecimiento y muerte de los microorganismos, ya que el sustrato alimentado nunca se va a agotar. Por lo tanto, los microorganismos presentaran una tasa de natalidad y mortalidad constante.
- Se determinaron las constantes de crecimiento bacteriano y rendimiento para cada fase, Fase 1:  $K=5,36E^{+04}$ ,  $Y=2,45E^{-03}$ ; Fase 2:  $K=6,49E^{+04}$ ,  $Y=1,99E^{-03}$ , Fase 3:  $K=7,97E^{+04}$ ,  $Y=1,63E^{-03}$

## RECOMENDACIONES

- Realizar un seguimiento y tratamiento previo de otras variables tal como el pH, con el fin de mantener este en un rango óptimo para la digestión anaerobia y con ello lograr aumentar las eficiencias de remoción de materia orgánica en el sustrato que se vaya a tratar.
- Se recomienda mantener el sustrato de alimentación de los reactores en un rango de pH entre 7 y 7.5 para aumentar el rendimiento de la digestión anaerobia. “La actividad de las bacterias metanogénicas también disminuye si el pH aumenta por encima de 7.5 (Zerges, 1987).
- Para futuras investigaciones se recomienda trabajar los filtros anaerobios de flujo ascendente (TRI-FAFS) con la misma disposición de volúmenes (80%-10%-10%), tiempos de retención hidráulica mayores a 16 horas y temperatura igual a 34°C.
- Se recomienda realizar una investigación donde se estudie la cantidad de biogás generado y la viabilidad de utilizar este biogás como fuente de energía, por ejemplo, para el mismo calentamiento del sistema de alimentación, obteniendo así un sistema sustentable.
- Analizar y medir la generación  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , con el fin de evaluar el TRH, en que se de la máxima producción de biogás, en función del tiempo de generación de los microorganismos metanogénicos.
- Muestrear y hacer siembras para cinética de crecimiento desde el momento inicial de operación de un filtro anaerobio de flujo ascendente TRI-FAFS, con las variables optimas ya planteadas, temperatura, TRH y COV

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo , R. (1998.). Ponencia: Tratamiento de lixiviados producidos en el Relleno Sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA. 1996., *IV seminario – taller latinoamericano sobre el Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales.*Bucaramanga,, p. 579 - 591.
- Alcaldia, P. (2018). *Alcaldia Pamplona*. Obtenido de <http://pamplona-nortedesantander.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Amokrane, A., Comel, C., & Veron , J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *7 Elsevier Science Ltd. All rights reserved Printed in Great Britain, Wat. Res.* Vol. 31, No. 11, pp. 2775 2782, .
- Arango Bedoya, O., & Sanches e Sousa , L. (2009). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo uasb* (Vol. 7 No 2 ). España : Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cantabria.
- Arenas , J., & Marin , P. (2004). *Operación de un sistema de reactores piloto UASB para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Arrechea, A., Torres, M., Lloréns, M., & Díaz, O. (2015). *Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos*. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental 36, 3–16.
- Arroyave, G. (1996). *Factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca utilizando un sistema de digestión anaerobia de fases separadas (tesis pregrado)*. Valle del Cauca, Colombia.: Universidad del Valle,.

- Aslanzadeh , S., Rajendran, K., & Taherzadeh, M. J. (2014). *A comparative study between single-and two-stage anaerobic digestion processes: Effects of organic loading rate and hydraulic retention time. International Biodeterioration & Biodegradation.* 95.
- Capitulo VI. Cinética de la digestión anaerobia. (s.f.). En *Revisión bibliografica* (págs. 80-83).  
Obtenido de  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/morales\\_r\\_pm/capitulo6.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/capitulo6.pdf)
- Castro , H. F., Williams , N. H., & Ogram , A. (2000). Phylogeny of sulfate-reducing bacteria. *FEMS Microbiology Ecology* 31 (2000) 1-9, 2.
- Chernicharo, C. A. (1990). “*The effect of temperature and substrate concentration upon the performance of UASB reactors*”. Newcastle upon Tyne – England: University of Newcastle upon Tyne, Tesis doctoral .
- Cohen, A. (1983). *Two- Phase Digestion of Liquid and Solid Waste. In Third International Symposium on Anaerobic Digestion. Boston-USA.*
- Comisión Nacional del Agua. (s.f.). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente.* México. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/>
- Corrales , L., Antolinez , D. M., Bohorquez , J., & Corredor , A. M. (2015). *Anaerobic bacteria: processes they perform and their contribution to life sustainability on the planet.* Bogota, Colombia : NOVA. 2015; 13 (23): 55-81.
- Deng, Y., & Englehardt , J. (2007). Treatment of landfill leachate by the Fenton process. *Water Re-search.*, 40. 3683-3694.
- Díaz Baez , , M. C. (1987). Reactores anaeróbicos de alta tasa. *Revista de Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Vol. 4, No 2.*

- Díaz Báez, M. C., Espitia Vargas, S. E., & Molina Pérez, F. (2002). *Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Dinsdale, R., Hawkes, F., & Hawkes, D. (1997). *Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with thermophilic pre-acidification of instant-coffee-production wastewater*. Water Research,.
- Doyle, C., O'Toole, P., & Cotter, P. (2018). Genomic Characterization of Sulphite Reducing Bacteria Isolated From the Dairy Production Chain. *Front. Microbiol.* 9:1507., 4.
- Fernández Güelfo, L. A. (2008). Caracterización cinética de la degradación anaerobia termofílica seca de la forsu. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la biodegradabilidad del residuo. En *Capítulo III: Estudio semicontinuo con FORSU sintética* (págs. III-73, III-74). Cadiz: Universidad de Cádiz.
- Gaden, E. L. (1959). "Fermentation process Kinetics". *J. Biochem. Microbiol. Tech. Eng.* 1: 63.
- Ghosh, S., & Pohland, F. S. (1971). *Developments in anaerobic treatment processes*. *Biotechnol BioengSymp* (Vols. (Vol. 2, ). No. 85,.
- González Cabrera, A. M. (2014). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.
- Ince, O. (1998). *Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater*. *Water Research*,. 32, 2707-2713.
- Ingeniería ambiental para el sector industrial . (2014). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. [online] . Obtenido de Available at: <https://blog.condorchem.com/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales/>

Instituto Valenciano de Microbiología . (15 de 04 de 2018). *Bacterias productoras de H<sub>2</sub>S (reductoras de sulfato, sulfito azufre y otras moléculas de azufre)- Cultivo cualitativo y cuantitativo; identificación molecular (PCR y secuenciación)*. Obtenido de <https://www.ivami.com/es/microbiologia-de-alimentos/5444-bacterias-productoras-de-h2s-reductoras-de-sulfato-reductoras-de-sulfito-reductoras-de-azufre-y-otras-moleculas-con-azufre-cultivo-cualitativo-y-cuantitativo-e-identificacion-molecular>

Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. (2014). *Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2, 1821- 1830.

Koneman , E. W., Allen , S. D., Dowell , V. R., Janda , W. M., Sommers, H. M., & Winn, W. C. (1997). *Dianostico microbiológico. Texto y Atlas Color. 3a. edición*. Mexico: Panamericana.

Leal Carrillo , Y. A., Serrano Garcia , F. Y., & Maldonado M, J. I. (2016). *Biotratamiento de lixiviados en sistemas anaerobios de tres fases*. Pamplona: Universidad de Pamplona.

López, N., Jiménez, L., Maldonado, J.,. (2017). *Biotratamiento de lixiviados con microorganismos anaerobios mesófilos en filtros de tres fases*. Pamplona: Universidad de Pamplona. Colombia.

Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar [en línea]* , 38. Obtenido de <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>> ISSN 0138-6204

Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. (2005). *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. Obtenido de en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>> ISSN 0138-6204

- Luo, J., Qian, G., Liu, J., & Xu, Z. (2015). *Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 21–28.
- Mediterráneo, E. (2010). ¿Que es y cuál es la utilidad del biogás? . *El Periódico Mediterráneo*, Online. Recuperado el 22 de abril de 2018, de [http://www.elperiodicomediterraneo.com/noticias/opinion/que-es-cual-es-utilidad-biogas\\_566109.html](http://www.elperiodicomediterraneo.com/noticias/opinion/que-es-cual-es-utilidad-biogas_566109.html)
- Mendoza, A. (2009). *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Planta de tratamiento de lixiviados – parque ambiental los pocitos*. Barranquilla.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización*. (3 Edición. ed., Vol. Tomo I.). México: Editorial Mc Graw Hill.
- Ministerio del Medio Ambiente . (2002). *Guía Ambiental Para Rellenos Sanitarios*.
- Moletta, R. (1993). *La digestion anaérobic: du plus petit au plus grand*. . *Biofutur* 1,.
- Morales, C. J. (2007). *Estudio para la remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios*. Univeridad Nacional.
- NG, W. J., , Hu., J. Y., , Ong, S. L., , & Aziz, M. A. . (1999). Effect of acidogenic stage on aerobic toxic organic removal. *Journal of environmental engineering*,, 125(6), 495- 500.
- Osorio Trujillo , A. F., & Vásques Botero , J. C. (2007). *Evaluación de la remoción de materia orgánica en filtros anaerobios de flujo ascendente utilizando aguas residuales sintéticas*. Pereira Colombia : Universidad Tecnológica Pereira .
- Padilla Gasca , E. (2010). *Evaluacion de un filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro*. Guadalajara Jalisco : Centro de investigación y asistencia en tecnologia y diseño del estado de Jalisco, A.C. .



- Rodríguez V., J. A. (s.f.). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Rodriguez , J., Maldonado, J., & Cajiao, A. (2017). *Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases (DI – FAFS)*. Pamplona: Universidad de Pamplona. Colombia.
- Rodriguez Chona , J. A., & Maldonado , J. I. (Pamplona). *Determinar el volumen metanogenico requerido en el proceso de remocion de materia organica. Empleando filtros anaerobios de flujo ascendente separados en dos fases (di-fafs)*. 2016.
- Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. (3 ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2001). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y Principios de Diseño*. Bogota.: Escuela Colombiana de Ingeniería (Reimpresión).
- Selvam, A., Xu, S. Y., Gu, X. Y., & Wong, , J. W. (2010). *Food waste decomposition in leach bed reactor: role of neutralizing solutions on the leachate quality*. *Bioresour. Technol.* 101 (6), 1707–1714.
- Sistemas de tratamiento individual para aguas residuales ordinarias. (s.f.). En *Fundamentos para el manejo de aguas residuales* (pág. Capítulo 3. ).
- Soria Melguizo, F. S. (2009). *Ficha técnica: SPS AGAR Y SPS doble concentración AGAR*.  
Obtenido de [http://f-soria.es/Inform\\_soria/Difco%20Fichas%20tecnicas/TUBOS%20DIFCO/FT%20SPS%20AGAR.pdf](http://f-soria.es/Inform_soria/Difco%20Fichas%20tecnicas/TUBOS%20DIFCO/FT%20SPS%20AGAR.pdf)

- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., & Ghrabi, A. (2007). Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. *Journal of Hazardous Materials.*, 140. 316-324.
- Waritch, M. A., & Sharma, R. (1998). “Technical review of methods to enhance biological degradation in sanitary landfills”,. *Water Quality Research Journal of Canada* .
- Yenigun, O., & Demirel, B. (2013). *Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review. Process Biochemistry, 48, 901–911.*