

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN FRIGORÍFICO EN QUITO

ERIKA ROCIO SUAREZ BARBOSA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA

2018

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN FRIGORÍFICO EN QUITO

ERIKA ROCIO SUAREZ BARBOSA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

DIRECTORES

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ  
INGENIERO QUÍMICO, PhD.

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO  
INGENIERA QUÍMICA, PhD.

JAIME MARTÍ HERRERO  
FÍSICO, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA

2018

## *Dedicatoria*

A Dios por permitirme alcanzar esta meta y por las bendiciones que me dio durante esta trayectoria

A mi madre, a quien con su amor y dedicación me ha guiado por el mejor camino.  
A ella por ser mi mayor motivación con todo mi amor.

A mi padre, por su apoyo y no perder la fe en mí. A él quien ha sido mi modelo a seguir.

A mis hermanas por su amor y apoyo, por sus consejos y por estar ahí cuando más las necesite.

A Luciana por ser la motivación especial que necesitaba, a ella por llenar de amor y alegría a esta familia.

A mi abuelita Trinidad, a ella que ha sido una de las motivaciones más importantes para completar este sueño. A ella de corazón que ha sido un gran apoyo.

A Imer, por su amor, su apoyo y compañía. A él que con su amor logró hacer de esta experiencia una historia diferente.

A mi familia que de una u otra forma me ha colaborado y/o apoyado durante este largo recorrido.

A Richard (q.e.p.d) por marcar la vida de cada una de las personas que conoció.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a Dios, que quien con su amor me ha guiado a cumplir este importante sueño.

A la profesora Liliana Castro por darme la oportunidad de participar en este proyecto. Agradezco su colaboración, apoyo, motivación y los diferentes consejos durante la realización de este proyecto.

Al profesor Humberto Escalante por su orientación, apoyo y colaboración durante el desarrollo de esta tesis.

Al doctor Jaime Martí por mostrarme su conocimiento sobre biodigestores, por su colaboración y apoyo. Y por las diferentes experiencias paralelas a la ejecución de este proyecto.

A Imer por su colaboración y aporte a este proyecto. Su esfuerzo y dedicación que se vieron reflejados en la finalización de esta etapa

A los analistas del laboratorio del INER: Michelle, Boris, Fernanda, Danny y Paola. Especialmente a Paola Cuji por su colaboración y hospitalidad durante nuestra estadía en Quito

A Paola Morales por su colaboración en la ejecución de esta tesis.

A mis amigos que siempre me han apoyado

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. METODOLOGÍA.....	20
1.1. INFORMACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	20
1.2. DISEÑO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR .....	20
1.2.1. Disponibilidad de materia prima .....	20
1.2.2. Materiales de construcción del biodigestor .....	21
1.2.3. Localización del biodigestor (BDG).....	21
1.2.4. Determinación de los parámetros del biodigestor .....	22
1.2.5. Sistema de aislamiento térmico (SAT) .....	24
1.2.6. Montaje e instalación del biodigestor .....	24
1.2.7. Puesta en marcha del biodigestor.....	26
1.3. PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN EL BIODIGESTOR .....	26
1.3.1. Monitoreo del proceso de digestión anaerobia .....	26
1.3.2. Estabilización del BDG.....	27
1.4. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	27
1.5. EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	27
1.5.1. Producción de biogás.....	27
1.5.2. Composición del biogás.....	28
1.6. POTENCIAL ENERGÉTICO.....	28
2. RESULTADOS .....	30
2.1. DISEÑO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR.....	30

2.1.1. Disponibilidad de materia prima .....	30
2.1.2. Parámetros de diseño del biodigestor.....	32
2.1.3. Sistema de aislamiento térmico (SAT).....	35
2.2. MONITOREO DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA.....	35
2.3. PRODUCCION DE BIOGÁS.....	36
3. CONCLUSIONES .....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	49
ANEXOS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de sacrificio animal aplicado por la EMRAQ-EP. ....	16
Figura 2. Sistema de tratamiento de aguas residuales de la EMRAQ-EP. ....	17
Figura 3. Localización del biodigestor de acuerdo a la organización de la planta de tratamiento de AR. ....	22
Figura 4. Parámetros de diseño de la zanja, unidades en metros. ....	23
Figura 5. Diagrama de biodigestor. ....	24
Figura 6. Instalación del biodigestor. ....	25
Figura 7. Recolección de muestras para análisis. ....	27
Figura 8. Variación de sólidos volátiles según el día y la hora de sacrificio. ....	30
Figura 9. Variación diaria del pH y la temperatura del AR. ....	32
Figura 10. Biodigestor Instalado en EMRAQ-EP. ....	34
Figura 11. Variación de la temperatura a través del sistema de biodigestores .....	35
Figura 12. Variación de los SV dentro del sistema de biodigestores para una carga de 26 m <sup>3</sup> . ....	36
Figura 13. Volumen acumulado de biogás y carga de los biodigestores .....	37
Figura 14. Porcentaje de CH <sub>4</sub> en la cúpula de los biodigestores. ....	39
Figura 15. Porcentaje de CO <sub>2</sub> en la cúpula de los biodigestores. ....	39
Figura 16. Variación del pH dentro del sistema de biodigestores .....	41

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de las AR de un frigorífico. ....	19
Tabla 2. Propiedades térmicas de los materiales del biodigestor. ....	24
Tabla 3. Parámetros de operación.....	26
Tabla 4. Parámetros del biodigestor. ....	33
Tabla 5. Ficha técnica de la geomembrana.....	53

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Autorización de uso de datos .....	52
Anexo B. Ficha técnica geomembrana .....	53
Anexo C. Registro fotográfico .....	54

## NOMENCLATURA

AGV	ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES
AR	AGUAS RESIDUALES DE FRIGORÍFICO
BDG	BIODIGESTOR
D	ANCHO DE LA ZANJA
DA	DIGESTIÓN ANAEROBIA
DBO	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO
DQO	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO
EB	ENTRADA BIODIGESTOR
L	LONGITUD DE LA ZANJA
SB	SALIDA BIODIGESTOR
ST	SÓLIDOS TOTALES
SV	SÓLIDOS VOLÁTILES
THR	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO

## RESUMEN

**TÍTULO:** IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR DE BAJO COSTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN FRIGORÍFICO EN QUITO\*

**AUTOR:** ERIKA ROCIO SUAREZ BARBOSA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** BIOGÁS, DIGESTIÓN ANAEROBIA, DIESEL, BIODIGESTOR

**DESCRIPCIÓN:** El proceso de sacrificio animal que realiza la EMRAQ implica el uso de combustible fósiles (diésel) y la producción de aguas residuales que generan problemas económicos y ambientales para la empresa. Debido a estos se buscan alternativas para un proceso de sacrificio animal más sustentable. De este modo, la implementación de la digestión anaerobia(DA) presenta una alternativa interesante y viable por su capacidad de disminuir la carga orgánica de las aguas residuales, producir combustible (biogás) y recuperar nutrientes mediante el uso del efluente. En el desarrollo de este trabajo de investigación se realizó el montaje, instalación y puesta en marcha de un sistema de biodigestores de bajo costo para la implementación de la DA en el tratamiento de aguas residuales de un frigorífico en la ciudad de Quito. Se caracterizaron las aguas residuales del afluente obteniendo en promedio valores de 0,27%SV, pH de 7.4 y una temperatura promedio de 18,6°C. El caudal de diseño del afluente fue de 40 m<sup>3</sup> con un tiempo de retención de diez días se calculó el volumen del biodigestor. Se instaló un sistema de biodigestores de 400 m<sup>3</sup> conectados en serie, debido a las bajas temperaturas de Quito se diseñó e implementó un sistema de aislamiento térmico. La puesta en marcha de biodigestor se realizó en dos etapas operadas en modo batch y semicontinuo respectivamente. La operación en modo semicontinuo dio inicio con un caudal promedio del afluente de 20 m<sup>3</sup> y una velocidad de carga orgánica de 0,34kg<sub>SV</sub>/m<sup>3</sup>\*d. Durante esta etapa de operación se redujo la carga orgánica de las aguas residuales en un 70%. Se alcanzó producción promedio de 76 m<sup>3</sup> con una concentración promedio de CH<sub>4</sub> del 68%. El rendimiento se determinó con el PBR y el SPB que alcanzaron valores promedio de 0.07 [ $m^3_{biogas}/m^3_{BDG}/d$ ] y 0.6[ $m^3_{biogas}/kg_{SV}$ ] respectivamente.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Humberto Escalante Ing. Químico PhD, Liliana Castro Molano Ing. Químico PhD y Jaime Martí Físico PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPLEMENTATION OF A LOW COST BIODIGESTOR FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM A REFRIGERATOR IN QUITO\*

**AUTHOR:** ERIKA ROCIO SUAREZ BARBOSA\*\*

**KEY WORDS:** BIOGAS, ANAEROBIC DIGESTION, DIESEL, BIODIGESTOR

**DESCRIPTION:** The process is animal sacrifice that performs the EMRAQ implies the use of fossil fuel (diesel) and the production of wastewater that generates economic and environmental problems for the company. Because of these, alternatives are sought for a more sustainable animal slaughter process. Thus, the implementation of anaerobic digestion (DA) presents an interesting and viable alternative for its ability to reduce the organic load of wastewater, produce fuel (biogas) and recover nutrients by using the effluent. In the development of this research, work was done the assembly, installation and implementation of a system of low-cost biodigestors for the implementation of the DA in the treatment of wastewater from a refrigerator in the city of Quito. The residual waters of the tributary were characterized by obtaining in average values of 0.27% SV, pH of 7.4 and an average temperature of 18.6 °C. The flow of design of the tributary was 40 m<sup>3</sup> and with a retention time of ten days, the volume of the Biodigestor was determined. A system of 400 M3 Biodigestors was installed, due to the low temperatures of Quito; a thermal insulation system was designed and implemented. The start-up of the biodigestor was carried out in two stages operated in batch and semi-continuous mode respectively. The operation in semi-continuous mode began with an average flow of the tributary of 20 M3 and an organic load speed of 0.34 Kg<sub>SV</sub>/m<sup>3</sup> \* d. During this phase of operation the organic load of wastewater was reduced by 70%. Average production of 76 m<sup>3</sup> of biogas was achieved with an average CH<sub>4</sub> concentration of 68% equivalent to diesel 46L. The performance was determined with the PBR and SPB that reached average values of 0,07[m<sup>3</sup><sub>biogas</sub>/m<sup>3</sup><sub>BDG</sub>/d] y 0,6[m<sup>3</sup><sub>biogas</sub>/kg<sub>SV</sub>] respectively.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physico-chemical engineering. School of Chemical Engineering. Directors: Humberto Escalante Eng. Chemist PhD, Liliana Castro Molano Eng. Chemist PhD and Jaime Martí physicist PhD.

## INTRODUCCIÓN

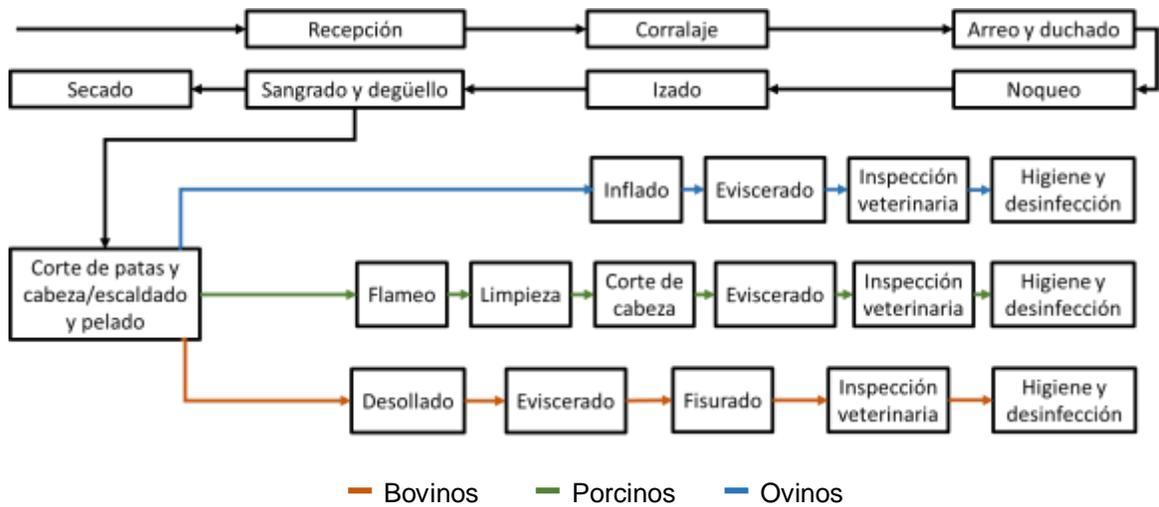
Las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), proyectan un aumento del 1,6% en la producción global de carne siendo Asia, Latinoamérica, Norteamérica y África los de mayor contribución en producción [1].

La producción de carne que suplirá la demanda estará limitada por los precios y la accesibilidad a los insumos (energía, mano de obra, agua y tierra), por esta razón se buscan alternativas que contribuyan a una producción de carne más sustentable para así cumplir con la demanda de cárnicos en un futuro.

Particularmente en Ecuador, al sur de Quito en la Parroquia Turubamba de Monjas de la Ciudadela La Ecuatoriana (0° 19' 0,844" S 78° 33' 53,11" O) se encuentra ubicada la empresa pública metropolitana de rastro de Quito (EMRAQ-EP), institución encargada de operar el sistema de sacrificio animal y la comercialización de productos cárnicos para el Distrito Metropolitano de Quito. Esta planta de beneficio animal sacrificó 55.000 bovinos, 19.000 ovinos y 80.000 porcinos en el año 2016 [2].

La Figura 1 presenta el proceso de sacrificio animal de la planta de beneficio EMRAQ-EP. El beneficio animal comienza con la recepción de los animales (en un tiempo no mayor a 24 horas previas al sacrificio). Los animales son llevados al corral donde son hidratados y luego duchados, posteriormente son conducidos a la zona de sacrificio donde son noqueados e izados. El proceso de sangrado y degüello se realiza para las tres especies de sacrificio, el corte de patas y cabeza solo se realiza para los bovinos y ovinos; los cerdos son introducidos en una caldera de agua caliente para el proceso de escaldado y pelado. A partir de este punto el proceso de sacrificio animal es diferente para cada especie [2]

Figura 1. Proceso de sacrificio animal aplicado por la EMRAQ-EP.



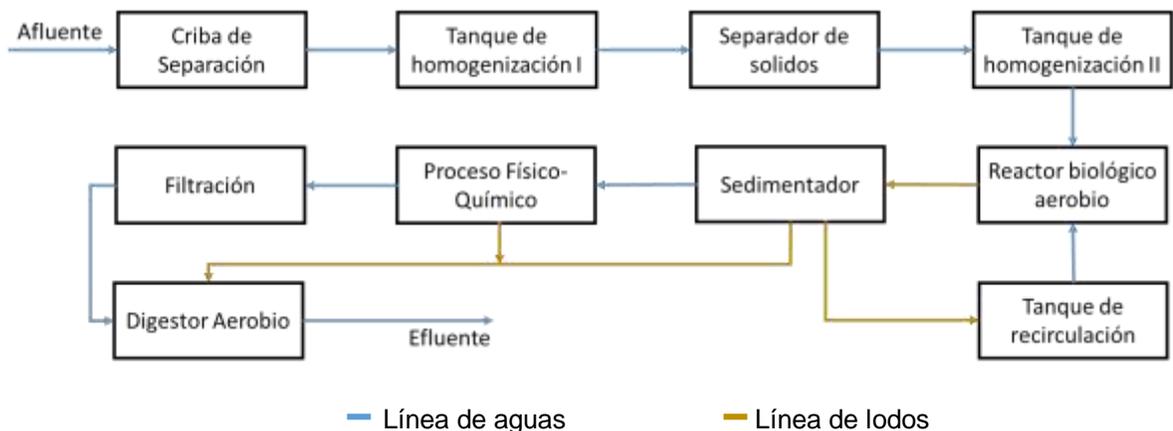
El proceso de sacrificio animal representa altos consumos de agua y energía. En el año 2016, se produjeron 100.000 m<sup>3</sup> de aguas residuales (AR) y un consumo mensual de diésel de 26.000 litros aproximadamente [3]; lo que genera un problema ambiental y económico para la empresa.

Actualmente, se producen en promedio 400 m<sup>3</sup>/día de AR. Estas aguas son conducidas a la planta de tratamiento de aguas residuales del camal metropolitano de Quito (PTAR-CMQ). La Figura 2 presenta el proceso del tratamiento de aguas. El agua residual atraviesa la criba de separación, que es la encargada de retener los sólidos de mayor tamaño. El agua filtrada pasa a un tanque de homogenización I (subterráneo) y, una vez alcanzado cierto nivel del tanque, el agua es bombeada a un separador (separación por extrusión) encargado de retirar los sólidos de menor tamaño. El agua obtenida del separador llega a un tanque de homogenización II. Así, el agua almacenada en el tanque de homogenización II es realimentada a la planta de tratamiento de AR. El tratamiento de esta agua consiste en una primera etapa de aireación y agitación en un reactor biológico, seguido de una etapa de sedimentación de lodos en un tanque en forma de cono recto invertido (sedimentador secundario). Del proceso anterior se obtienen aproximadamente 3,3

m<sup>3</sup>/día de lodos activados [4] con un caudal de recirculación de 10m<sup>3</sup>/hora al reactor biológico. El agua resultante pasa a un tratamiento físico-químico (tratamiento terciario) donde son removidos materia orgánica residual y sustancias contaminantes. Finalmente, las aguas atraviesan un filtro con arena y grava encargado de eliminar las partículas en suspensión, el efluente obtenido es vertido al sistema de alcantarillado. La planta cuenta con digestor aerobio encargado de disminuir la concentración de la materia orgánica, pero que actualmente no se encuentra en funcionamiento. [2].

La PTAR-CMQ fue diseñada para tratar en promedio 140 m<sup>3</sup>/día [4]. Sin embargo, actualmente se excede del caudal de diseño en un 250%. La variabilidad del proceso de sacrificio respecto al tipo y número de animales sacrificados afecta la eficiencia de la planta, generando variación en las características fisicoquímicas de las aguas que en ocasiones generan espumas y una sobrecarga a la planta. Con una eficiencia del 92,87% en remoción de contaminantes la planta no cumple con la normatividad municipal para el vertimiento en el sistema de alcantarillado [4] además de la proliferación de olores que afectan a la comunidad.

**Figura 2. Sistema de tratamiento de aguas residuales de la EMRAQ-EP.**



Teniendo en cuenta la situación descrita anteriormente, se necesita implementar procesos alternos de tratamiento de agua para cumplir con las exigencias técnicas y ambientales de la planta de sacrificio.

Una de las alternativas para dar solución a esta problemática es la digestión anaeróbica. Este proceso presenta un triple beneficio: A) la disminución de la carga orgánica que trata la PTAR-CMQ B) a partir del biogás producido disminuir el consumo diésel utilizado en las diferentes etapas de faenamiento C) y la producción de un digerido que podría ser usado como fertilizante.

En un estudio previo se determinó que el potencial de biometanización (PBM) de las AR alcanzan valores de 0,73 y 0,71  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{SV}}$  a temperaturas de 37°C y 30°C respectivamente [5]. Teniendo en cuenta los cambios en los procesos de sacrificio en cada uno de los casos existe variabilidad de las características fisicoquímicas de las AR (*Tabla 1*), pero la concentración de carga orgánica beneficia los procesos de DA [6]. Teniendo en cuenta los resultados previos de PBM y la caracterización de las AR se determinó que son una materia prima potencial para la implementación de procesos de DA

Tradicionalmente el tratamiento de las aguas residuales es llevado a cabo en reactores UASB. Este tipo de reactores permiten tratar altos volúmenes de aguas, con una elevada producción de metano y una baja producción de lodos [6]. Los componentes coloidales y en suspensión de las AR son una desventaja de los reactores UASB, puesto que disminuyen la actividad microbiana [7]. Una alternativa a este tipo de reactores es el uso de biodigestores de bajo costo que se caracterizan por sus beneficios técnicos y económicos dado que no necesitan agitación y tienen una baja inversión en materiales. Además de ser una tecnología que ya ha sido utilizada para el tratamiento de estos residuos y donde se han obtenido resultados [8].

**Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de las AR de un frigorífico.**

Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
DQO	mg/L	1567	[9]
		87.23-2080	[10]
		9858	[11]
		1000	[12]
		1494	[13]
DBO	ppm	5348	[11]
	mg/L	37.95-1339	[10]
		658	[13]
ST	mg/L	0.390-103.5	[10]
		19717	[13]
	ppm	983	[11]
SV	mg/L	395	[13]
pH		6.53	[9]
		6.8-7.0	[10]
		5.9	[11]
		6.7	[12]
Nitrógeno total	mg/L	161.2-254.7	[10]
	ppm	392	[11]

De esta manera como solución al problema de la EMRAQ-EP, se planteó el proyecto denominado “Biogas from slaughterhouse waste water treatment for heating purpose” (Anexo A). En el marco del desarrollo del proyecto en mención se realizó el presente trabajo de grado modalidad pasantía de investigación. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue realizar el diseño, implementación y puesta en marcha de biodigestores de bajo costo para el tratamiento anaerobio de aguas residuales de la planta de sacrificio de la Empresa Publica Metropolitana de Rastro de Quito.

## 1. METODOLOGÍA

### 1.1. INFORMACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La Empresa Pública Metropolitana de Rastro de Quito, es la empresa encargada de sacrificio y comercialización de especies animales para el consumo humano. La EMRAQ-EP se encuentra ubicada en la Parroquia Turubamba de Monjas de la Ciudadela La Ecuatoriana ( $0^{\circ} 19' 0,844''$  S  $78^{\circ} 33' 53,11''$  O). Con un clima de altiplano la EMRAQ-EP se encuentra a 3033 msnm con una temperatura promedio  $13,9^{\circ}\text{C}$  y precipitaciones de 1273 mm al año. La EMRAQ-EP sacrifica aproximadamente 590 cabezas de ganado al día.

### 1.2. DISEÑO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR

**1.2.1. Disponibilidad de materia prima.** El proceso de sacrificio produce  $400\text{m}^3$  diarios de AR. El AR es conducida a la PTAR-CMQ que se encuentra ubicada a 80m de la zona de sacrificio. Debido al elevado caudal de AR producidas por la EMRAQ-EP se tomó la decisión de tratar el 10% de las AR. Calculando el caudal de entrada al biodigestor se determinó que la carga máxima diaria es de  $40\text{m}^3$ , esto se conoce como caudal del afluente ( $Q_{\text{afluente}}$ ).

De las AR producidas se analizó la variación de SV, teniendo en cuenta el día y la hora del proceso de sacrificio animal, esto para determinar si la variación pudiera llegar a afectar el proceso. Para esto se tomaron una muestra cada hora, dos días a la semana durante un mes. Adicionalmente a las AR se les analizó pH y temperatura dos días a la semana durante dos semanas. Los SV fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods [14]

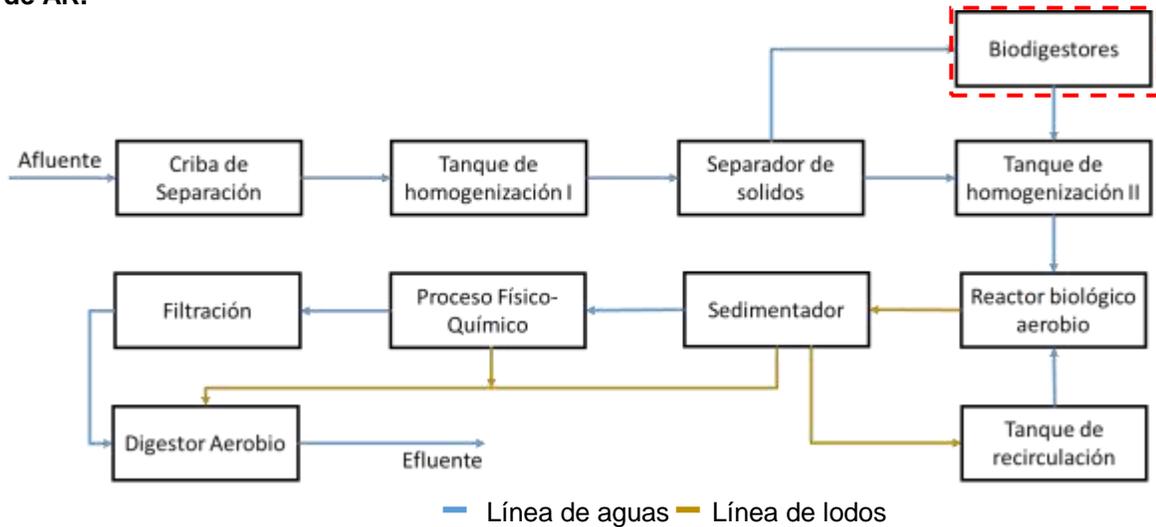
### **1.2.2. Materiales de construcción del biodigestor**

- El material utilizado en el cuerpo del biodigestor fue geomembrana de PVC simple (no reforzada) de 1.5 mm de espesor, con una presión máxima de 110 psi. Para la selección de la geomembrana se tuvieron en cuenta las características en términos de limitación de dimensiones y en el tiempo de vida útil. En el Anexo B se pueden encontrar otras características técnicas de la geomembrana.
- Para el sistema de aislamiento térmico se recubrieron las zanjas con 100 láminas de poliestireno expandido (PE) de 5 cm de espesor con densidad de 15kg/m<sup>3</sup>. En esta sección del biodigestor se utilizó el PE teniendo en cuenta las propiedades aislantes del material y adicional a esto la disponibilidad en la región.
- Para la tubería del biodigestor se utilizaron tres dimensiones: Tubería de 2 pulgadas para la salida del biogás. Tubería de 4 pulgadas para la salida de los lodos. Tubería de 6 pulgadas para las entradas y salidas de cada biodigestor.
- Como accesorios adicionales se utilizaron 4 llaves de paso de 4 pulgadas ubicadas en las salidas de lodos, 4 llaves de paso de 2 pulgadas para la salida del biogás y 6 codos de 6 pulgadas para interconectar los biodigestores.
- Rollo de geotextil (3.8m x 110 m) para la protección del sistema de aislamiento térmico y del biodigestor.

**1.2.3. Localización del biodigestor (BDG).** La localización del biodigestor se analizó teniendo en cuenta las propiedades y características del terreno de la EMRAQ-EP. La altura del separador de sólidos (3.5 m) permite alimentar el biodigestor por efecto de la gravedad. De esta manera se evita el uso de fuentes

externas de energía para la alimentación del BDG. Es decir que las AR se extraerán de esta sección de la PTAR-CMQ (Figura 3).

**Figura 3. Localización del biodigestor de acuerdo a la organización de la planta de tratamiento de AR.**



Se analizaron las características fisicoquímicas (SV, pH y temperatura) de las AR antes y después del separador de sólidos para determinar la localización del bypass encargado de desviar las AR hacia los biodigestores.

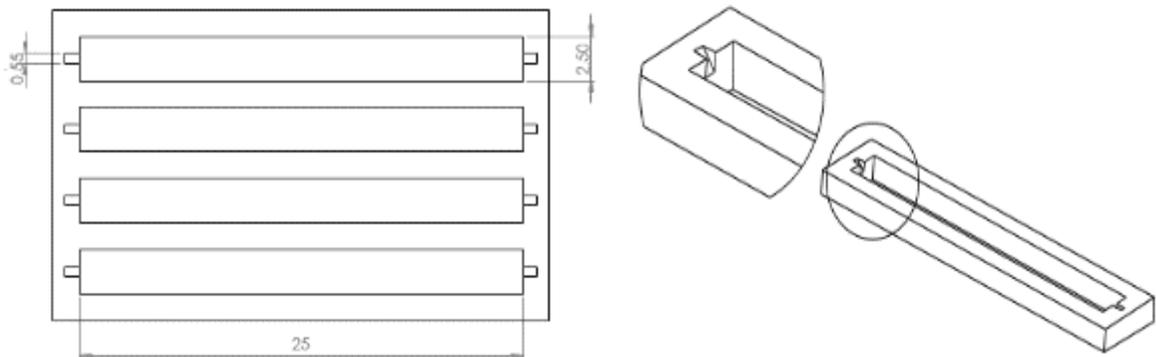
#### 1.2.4. Determinación de los parámetros del biodigestor

- **Volumen del biodigestor.** Teniendo en cuenta que el THR óptimo se encuentra entre 8 y 12 días, siendo 10 días el THR en el que se obtiene la mayor producción de biogás para el tratamiento de AR de un frigorífico [8]. Se determinó utilizar un  $THR_{teórico}$  de 10 días. Para el cálculo del volumen del biodigestor ( $V_{biodigestor}$ ) se tuvo en cuenta el caudal del afluente ( $Q_{afuente}$ ) y el tiempo de retención hidráulico teórico ( $THR_t$ ):

$$V_{biodigestor} = Q_{afuente} * THR_t$$

- **Dimensiones de la zanja.** La zanja tiene forma rectangular (Figura 4), debido a la extensión y la condiciones del terreno se tomó una relación L/D de 10, que se encuentra dentro del rango para diseño de biodigestores [14].

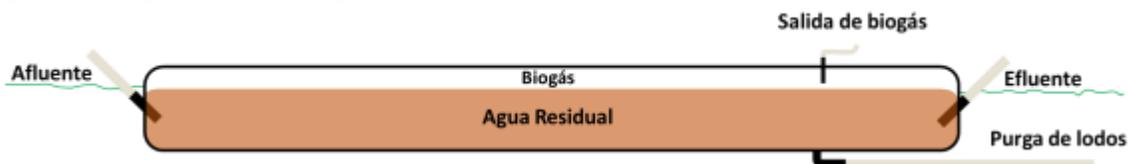
**Figura 4. Parámetros de diseño de la zanja, unidades en metros.**



- **Dimensiones del biodigestor.** Las dimensiones y características del biodigestor son calculados a partir de las propiedades de la zanja y teniendo en cuenta los parámetros de diseño establecidos para el diseño de biodigestores de bajo costo [14]. Teniendo en cuenta la flexibilidad de la geomembrana que llega a expandirse hasta un 400% no se determinó las dimensiones de la campana de biogás.

El biodigestor cuenta con un orificio de entrada para el afluente y uno de salida para el efluente con dimensiones 0.15m de diámetro, este último será conducido mediante tubería al tanque de homogenización II. Un orificio para la salida de biogás con diámetro de 0.05m, ubicada en la parte superior de la geomembrana. El BDG cuenta con una salida adicional para la extracción de los lodos, ubicada en la parte inferior del biodigestor y la cual es llevada al tanque de homogenización II (Figura 5)

Figura 5. Diagrama de biodigestor.



### 1.2.5. Sistema de aislamiento térmico (SAT)

Con una temperatura promedio de 13.5°C es necesario buscar alternativas que mejoren las condiciones de temperatura del biodigestor. El sistema de aislamiento térmico se diseñó teniendo en cuenta los parámetros del modelo expuesto por Martí-Herrero [15]. En el cual se tuvieron en cuenta dos factores: A) La transferencia de calor por convección (aire-BDG, AR-BDG, biogás-BDG, AR-biogás), conducción (SAT-BDG, SAT-suelo) y radiación (Sol-BDG) y B) las propiedades térmicas de los diferentes materiales (*Tabla 2*).

Tabla 2. Propiedades térmicas de los materiales del biodigestor.

PROPIEDAD	GEOMEMBRANA [16]	PE [17]	AR
CONDUCTIVIDAD [W/m*K]	0,38	0,042	0,6
Absorbancia	0,8	-	0,8
Emisividad	0,8	-	0,8
Transmitancia	-	-	-

### 1.2.6. Montaje e instalación del biodigestor

A partir de los parámetros calculados anteriormente el montaje de los biodigestores se llevó a cabo en dos etapas:

- **Primera etapa: Preparación de la zanja e instalación del SAT.** Se realizó la excavación zanjas rectangulares. En la parte posterior y anterior de la zanja se dejó una inclinación de 45° para las respectivas entradas y salidas de los biodigestores. Finalizada la preparación de la zanja se realizó la instalación del sistema de aislamiento térmico ubicando las láminas de PE en el suelo y las paredes de la zanja.
- **Segunda etapa: Montaje del biodigestor.** El biodigestor se ubicó en la zanja teniendo en cuenta la ubicación de las mangas de salida y entrada del agua residual. Cada manga fue asegurada con neumático para la prevención de fugas. Una vez ubicada la respectiva tubería el biodigestor fue llenado con aire y posteriormente con agua residual. Finalmente se realizaron las conexiones y las instalaciones de los equipos de medición para llevar a cabo la puesta en marcha del biodigestor.

**Figura 6. Instalación del biodigestor.**



### 1.2.7. Puesta en marcha del biodigestor

- **Condiciones de operación.** El BDG fue puesto en marcha en el mes de febrero del año 2017, una vez terminada la instalación los biodigestores fueron inflados con aire y llenados con AR para dar comienzo al proceso de DA. La puesta en marcha del BDG se realizó en dos etapas a diferentes condiciones de operación (Tabla 3). La relación de inóculo-sustrato (RIS) determinada para el biodigestor fue de 2. Durante esta etapa del proyecto no se llevó a cabo la alimentación del inóculo.

Tabla 3. Parámetros de operación

Parámetros de operación	Etapla I	Etapla II
Modo	Batch	Semicontinuo
Tiempo [días]	120	50
Volumen [m <sup>3</sup> ]	400	400
Presión [cm <sub>agua</sub> ]	8	3
Carga promedio [m <sup>3</sup> ]	80	20(diaros)

## 1.3. PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN EL BIODIGESTOR

### 1.3.1. Monitoreo del proceso de digestión anaerobia

La caracterización de las AR se realizó en la zona de los biodigestores (Figura 7). Las muestras se tomaron en los puntos instalados para la toma de muestras. Las muestras fueron tomadas a la entrada y salida de cada biodigestor durante el tiempo de estabilización del sistema.

**Figura 7. Recolección de muestras para análisis.**



### **1.3.2. Estabilización del BDG**

La estabilidad del BDG se cuantificó en función del pH. Las muestras de AR fueron recolectadas para el análisis de pH en las primeras horas de la mañana. Las pruebas se realizaron una vez a la semana durante dos semanas.

## **1.4. MÉTODOS ANALÍTICOS**

Los SV fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods [16]. Los ácidos grasos volátiles (AGV) fueron cuantificados por titulación de acuerdo al protocolo propuesto por Jobling [17]. Estos protocolos se llevaron a cabo en el laboratorio de Biomasa del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER)\*. El pH fue determinado utilizando pH-metro metrohm 691 y la temperatura con un sensor HOBO.

## **1.5. EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

### **1.5.1. Producción de biogás**

Una vez alcanzada la estabilidad de los biodigestores se dio comienzo a la evaluación del biogás producido. Para lo cual se realizaron mediciones diarias en un medidor de flujo instalado previamente (Medidor de diafragma marca Ester

---

\* En colaboración con la tesista Paola Morales de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de la ciudad de Quito

modelo: BK-G2,5 MT3066R). Las mediciones se realizaron a diferentes horas de la mañana y previamente a la carga diaria\*.

Teniendo en cuenta la velocidad de carga orgánica (OLR) que se determinó previa la puesta en marcha de  $0.34\text{kg}_{\text{SV}}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  se determinó: La tasa de producción de biogás (BPR) y la producción específica de biogás (SBP). La eficiencia del sistema se determinó contabilizando la producción promedio diaria a partir de la carga orgánica y al caudal del afluente.

### **1.5.2. Composición del biogás**

En la primera etapa de operación se midió el porcentaje de biogás en la cúpula de los biodigestores. Las mediciones dieron comienzo 45 días después de terminada la instalación, tiempo en el que se estabilizó el biodigestor. El muestreo se realizó antes de la carga diaria y una vez por semana para un total de 15 mediciones<sup>†</sup>. Estas mediciones se realizaron con el equipo ESCM-505 Portable O2 Sampling Data Logger.

## **1.6. POTENCIAL ENERGÉTICO**

El potencial energético eléctrico ( $P_{EE}$ ) y energético calórico ( $P_{EC}$ ) de las AR se calculó aplicando el método mostrado por Tricase [18]. Para determinar el  $P_{EE}$  y el  $P_{EC}$  teóricos se utilizó el potencial de biometanización (PBM) de  $0.71\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{SV}}$  determinado en una investigación previa [5]. El  $P_{EE}$  y el  $P_{EC}$  obtenidos se determinaron a partir del flujo acumulado mensual de biogás.

El método evalúa el potencial energético de las AR teniendo en cuenta el caudal de aguas residuales ( $Q_{AR}$ ), la densidad del agua residual ( $\rho_{AR}$ ), concentración de sólidos volátiles ( $SV_{AR}$ ), potencial de biometanización (PBM) y factores de conversión ( $\alpha$ ):

---

\* En colaboración con la tesista Paola Morales de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de la ciudad de Quito

† En colaboración con la tesista Paola Morales de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de la ciudad de Quito

$$P_{EE} = Q_{AR} * \rho_{AR} \frac{[SV]_{AR}}{1000} * PBM * \alpha_E$$

$$P_{EC} = Q_{AR} * \rho_{AR} \frac{[SV]_{AR}}{1000} * PBM * \alpha_C$$

Adicionalmente se determinó el porcentaje de ahorro energético y el ahorro económico teniendo en cuenta el consumo de energía de la EMRAQ-EP y el suministro de energía del biogás producido. Para el cálculo del ahorro económico se utilizó el precio promedio del diésel.

$$\%Ahorro\ energético = \frac{\text{Consumo mensual de diesel} - \text{Energía mensual suministrada por el biogás}}{\text{Consumo mensual de diesel}} * 100$$

$$Ahorro\ económico = \frac{\%Ahorro\ energético * \text{Costo del diesel por mes}}{100}$$

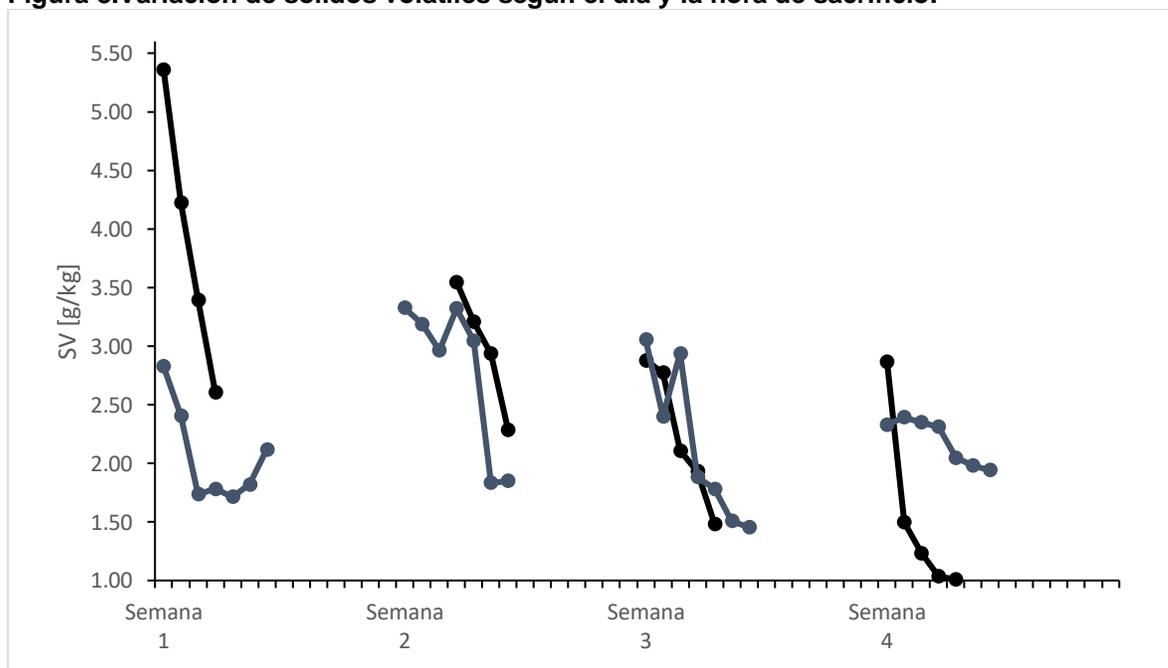
## 2. RESULTADOS

### 2.1. DISEÑO, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR

#### 2.1.1. Disponibilidad de materia prima

En la ( Figura 8) se presenta la variación de sólidos volátiles de AR durante un mes a diferentes horas del día. Se observa que el rango de SV se encuentra entre 1.01 g/kg (0.1%) y 5.36g/kg (0.53%), disminuyendo a lo largo del día. Los SV son bajos comparados con los expuestos por Ortner que se encuentran entre 0.7% y el 1.1% [19]. Las diferencias expuestas se deben a que el AR es diluida con el agua de lavado utilizada durante el proceso de beneficio. La baja concentración de sólidos en el reactor favorece la actividad metanogénica específica de los microorganismos [20].

Figura 8. Variación de sólidos volátiles según el día y la hora de sacrificio.



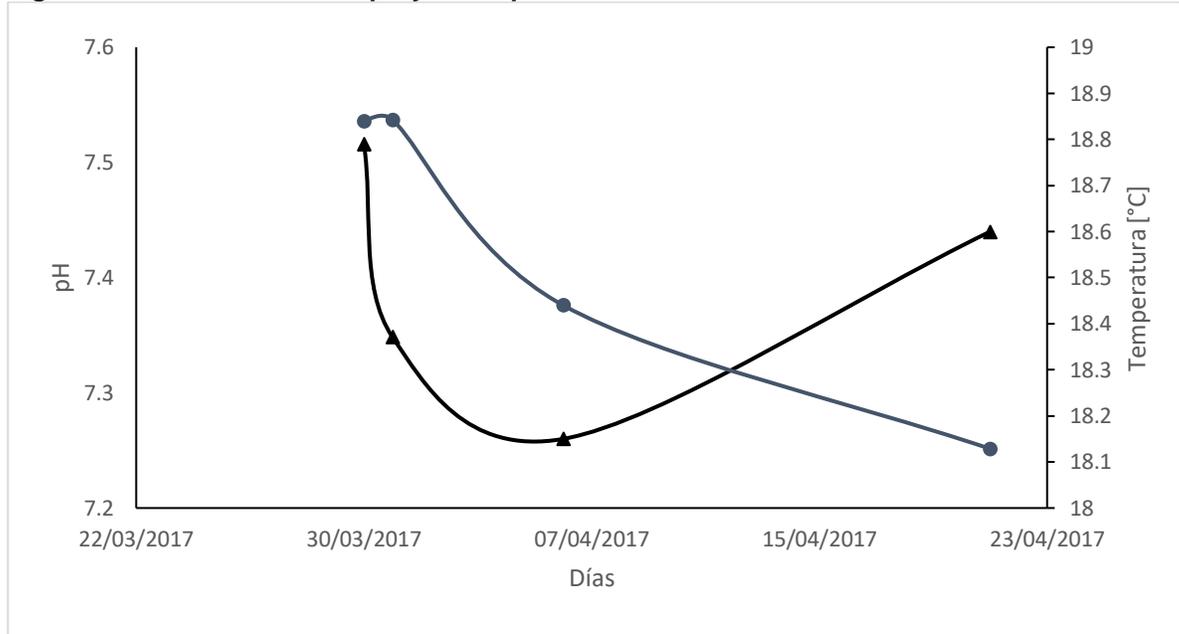
En términos generales, independientemente del día de sacrificio animal la concentración promedio de SV es 3.1 g/kg al inicio y 1.5 g/kg al final del proceso aproximadamente. Los sólidos volátiles se reducen durante el día debido a que al finalizar el proceso de sacrificio se incluye el lavado de la planta. Teniendo en cuenta la disminución en concentración de sólidos volátiles durante el transcurso del día es recomendable alimentar el biodigestor en las primeras horas del día para beneficiar el proceso anaerobio

Los AGV alcanzaron un valor de 2958 mg/L (medida tomada al inicio del día), lo cual indica que existe materia orgánica soluble fácilmente biodegradable disponible para ser metabolizada a acetato y posteriormente a biogás. Este valor es más alto que los reportados en la literatura [21]. Esto puede deberse a la hora de toma de muestra, como se explicó anteriormente al inicio del proceso el agua está más concentrada porque no incluye lavado de planta.

La Figura 9 muestra el promedio diario de pH y temperatura del AR de entrada al BDG. El pH se encuentra alrededor de 7.4 en promedio, el menor valor que presentó fue de 7.26 y el de mayor valor de 7.52, se mantienen dentro del rango de pH aceptable ( $4 < \text{pH} < 8$ ) para procesos anaerobios. [22].

Con una temperatura ambiente alrededor de los 13.5°C la temperatura del AR se mantiene alrededor de los 18°C. Esta temperatura corresponde al rango psicrófico y el proceso anaerobio presenta mejores rendimientos a temperaturas mesófilas (20°C a 37°C). Por lo anterior, se hace necesario implementar un sistema de aislamiento para el BDG. En casos previos a temperaturas ambiente alrededor de los 13°C aún se presentan procesos de anaerobiosis con rendimientos de  $4.5 m_{BDG}^3 / m_{carga\_organica}^3$  [23]

**Figura 9. Variación diaria del pH y la temperatura del AR.**



### **2.1.2. Parámetros de diseño del biodigestor**

En la (Tabla 4) se muestran los parámetros de diseño del sistema de digestión de la EMRAQ-EP. Teniendo en cuenta que el volumen del digestor fue  $400\text{m}^3$ , y que la planta de sacrificio tiene disponibilidad de terreno, se determinó que la mejor organización consistía en la división del sistema en cuatro biodigestores de  $100\text{ m}^3$  cada uno. La separación entre cada biodigestor fue de 1 m.

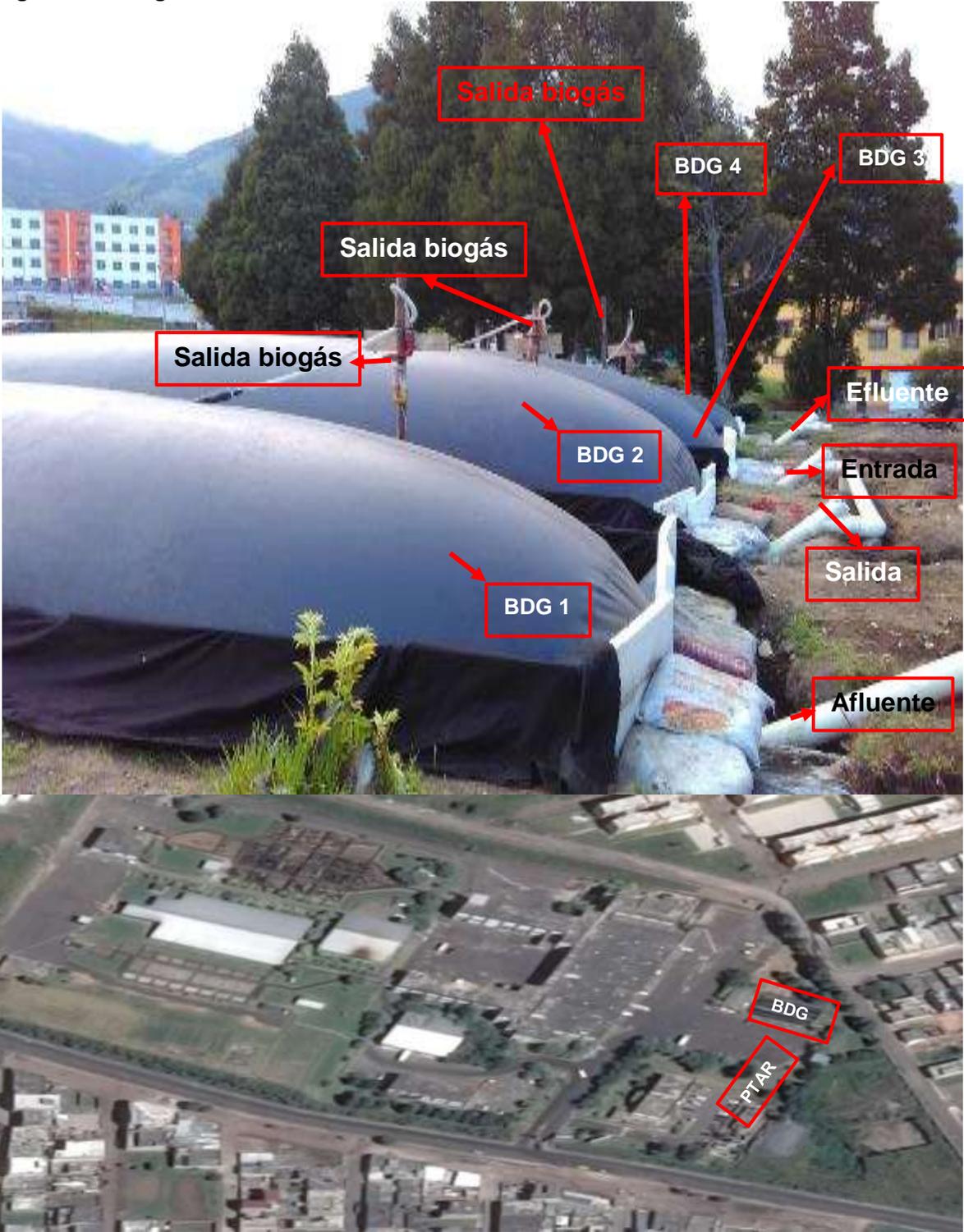
Una vez se terminó la instalación del sistema de aislamiento térmico y del biodigestor se llevó a cabo la conexión de los biodigestores, que consistió en un sistema de tubería en forma U que unía la salida de cada BDG con la entrada del siguiente BDG. De este modo cuando el primer biodigestor es cargado, se produce un rebalse del efluente que por gravedad es dirigido al segundo biodigestor. Este a su vez, rebalsa trasladando el efluente al tercer biodigestor y así hasta llegar al cuarto biodigestor, donde el efluente se rebalsa y es conducido a el tanque de homogenización II también por gravedad. En la **Figura 10** se presenta un registro fotográfico del sistema de biodigestores instalados y su ubicación.

**Tabla 4. Parámetros del biodigestor.**

	<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Biodigestor	Caudal promedio del afluente	m <sup>3</sup> /d	20
	Temperatura de operación	°C	18
	TRH	d	10
	Diámetro	m	2.5
	Radio	m	1.75
	Número de biodigestores		4
	Longitud	m	25
	Volumen	m <sup>3</sup>	400
	Volumen de operación (V <sub>L</sub> )	m <sup>3</sup>	80
Zanja	Ancho	m	2.5
	Alto	m	1.6
	Largo	m	25

Los análisis de las AR muestran la variación de las características fisicoquímicas antes y después del separador de sólidos. Antes: % SV (0.24), pH (7.99) y temperatura (18.5°C). Después: del separador de sólidos SV (0.28), pH (7.97) y temperatura (18.7°C). Se decidió instalar el bypass después del separador de sólidos teniendo en cuenta que los sólidos fibrosos presentan una limitante para los procesos de DA (Lagos, 2013), debido a que pueden producir taponamiento en el biodigestor.

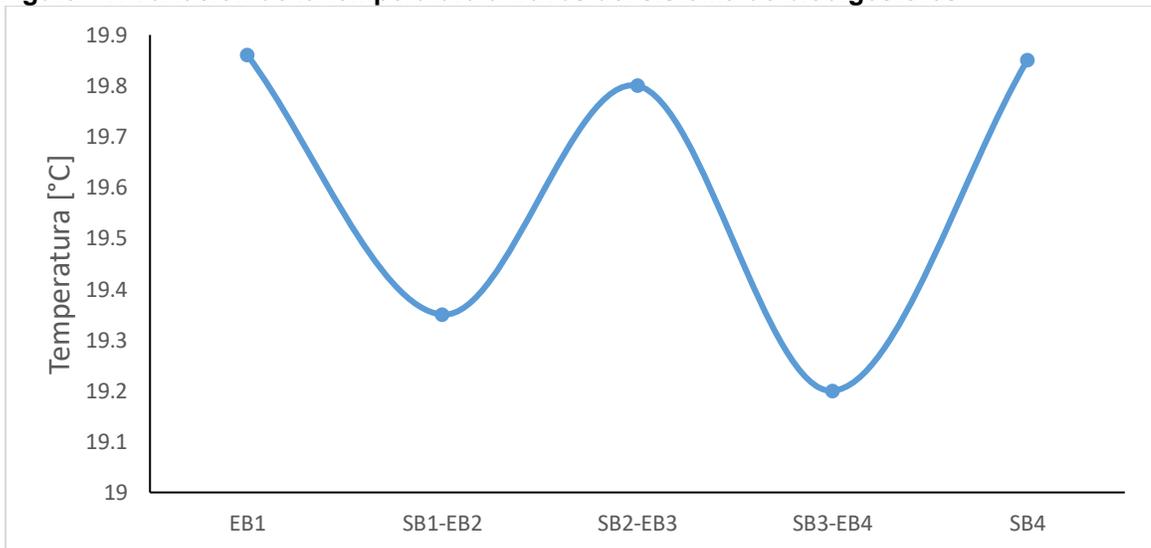
Figura 10. Biodigestor Instalado en EMRAQ-EP.



### 2.1.3. Sistema de aislamiento térmico (SAT)

El sistema de aislamiento térmico recubrió 157 m<sup>2</sup> con PE cada una de las zanjas. Las temperaturas mínima promedio y máxima promedio de Quito para los días de medición fue de 8°C y 17°C [24]. La medición de la temperatura en los puntos intermedios de los biodigestores (Figura 11) muestra que la temperatura se mantuvo en un valor alrededor de los 19,6°C. Si bien la variación de temperatura entre biodigestores no es significativa, comparando la temperatura del sistema con la temperatura ambiente o la temperatura del suelo ( incrementó de la temperatura aproximadamente entre 1°C y 3°C)se puede observar que el sistema de aislamiento permite mantener y mejorar la temperatura del agua aprovechando la radiación solar como se explicó previamente. En casos anteriores se registró que el sistema de aislamiento logró aumentar hasta 5°C [8].

**Figura 11. Variación de la temperatura a través del sistema de biodigestores**

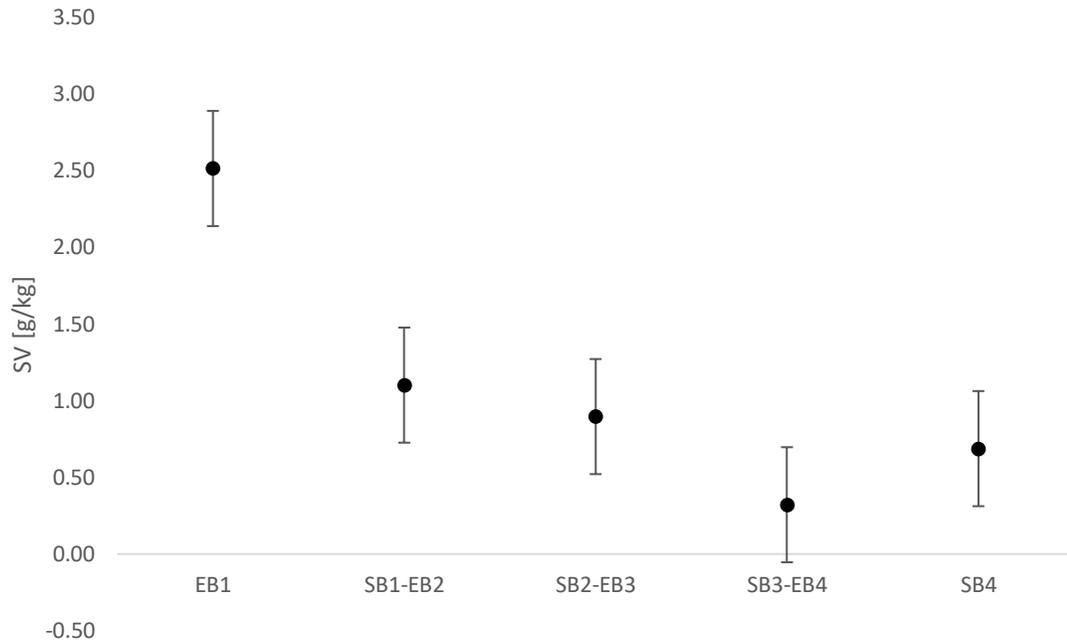


EB1 → Entrada biodigestor 1    EB2 → Entrada biodigestor 2    EB3 → Entrada biodigestor 3    EB4 → Entrada biodigestor 4  
SB1 → Salida biodigestor 1    SB2 → Salida biodigestor 2    SB3 → Salida biodigestor 3    SB4 → Salida biodigestor 4

## 2.2. MONITOREO DEL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA

En la Figura 12 muestra los SV obtenidos dentro del sistema de biodigestores. Se observa una disminución de la carga orgánica en el primer biodigestor. La variación de la carga orgánica para los demás biodigestores no es significativa.

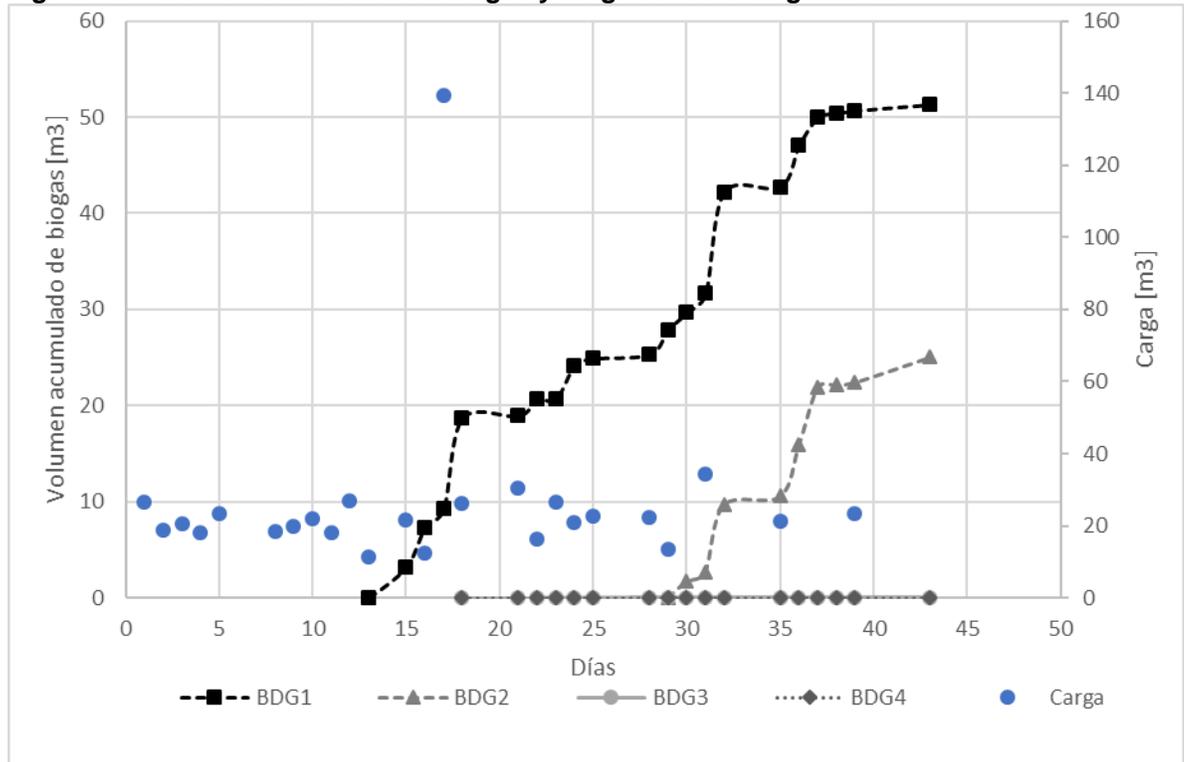
**Figura 12. Variación de los SV dentro del sistema de biodigestores para una carga de 26 m<sup>3</sup>**



### **2.3. PRODUCCION DE BIOGÁS**

En la Figura 13 se puede apreciar que con 40 días de carga el biodigestor 1 es quien presenta el mayor volumen acumulado de biogás con aproximadamente 51.3 m<sup>3</sup>, el biodigestor 2 alcanzó un volumen acumulado de biogás de 25 m<sup>3</sup>. El biodigestor 3 y 4 no presenta producción de biogás significativa. Los biodigestores 1 y 2 son los de mayor producción de biogás. Al alimentar el biodigestor la producción de biogás no se ve afectada. Adicionalmente se observa que en los días en que la alimentación del biodigestor se ve interrumpida continúa la producción de biogás. Los dos primeros días siguientes al último día de alimentación de la semana sigue la producción de biogás. Esto permite modificar la continuidad de las cargas de AR es decir la disminución del THR.

**Figura 13. Volumen acumulado de biogás y carga de los biodigestores**



La eficiencia del sistema se determinó contabilizando la producción promedio diaria a partir de la carga orgánica y al caudal del afluente. Teniendo en cuenta que el OLR del sistema de biodigestores es de  $0,11 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3/\text{d}$  donde el PBR y el SPB global del sistema de biodigestores fueron  $0,07 [\text{m}^3_{biogas}/\text{m}^3_{BDG}/\text{d}]$  y  $0,6 [\text{m}^3_{biogas}/\text{kg}_{SV}]$  respectivamente, produciendo  $1 \text{ m}^3$  por cada  $\text{m}^3$  de AR alimentada. La tasa de producción de biogás para el biodigestor uno y dos fueron  $0,05 [\text{m}^3_{biogas}/\text{m}^3_{BDG}/\text{d}]$  y  $0,09 [\text{m}^3_{biogas}/\text{m}^3_{BDG}/\text{d}]$  respectivamente. Analizando los resultados obtenidos del caso previo mencionado anteriormente: PBR de  $0,29 [\text{m}^3_{biogas}/\text{m}^3_{BDG}/\text{d}]$ , un SPB  $0,78 [\text{m}^3_{biogas}/\text{kg}_{SV}]$  con un OLR de  $0,34 \text{ kg}_{SV}/\text{m}^3/\text{d}$ , produciendo  $2,8 \text{ m}^3$  por cada  $\text{m}^3$  de AR.. A pesar de que en el biodigestor 1 se dio la mayor producción acumulada de biogás en el biodigestor 2 se da la mayor tasa de producción de biogás. El rendimiento del proceso no baja teniendo en cuenta que se espera que se produjeran  $2,2 \text{ m}^3$  por cada  $\text{m}^3$  de AR alimentada.

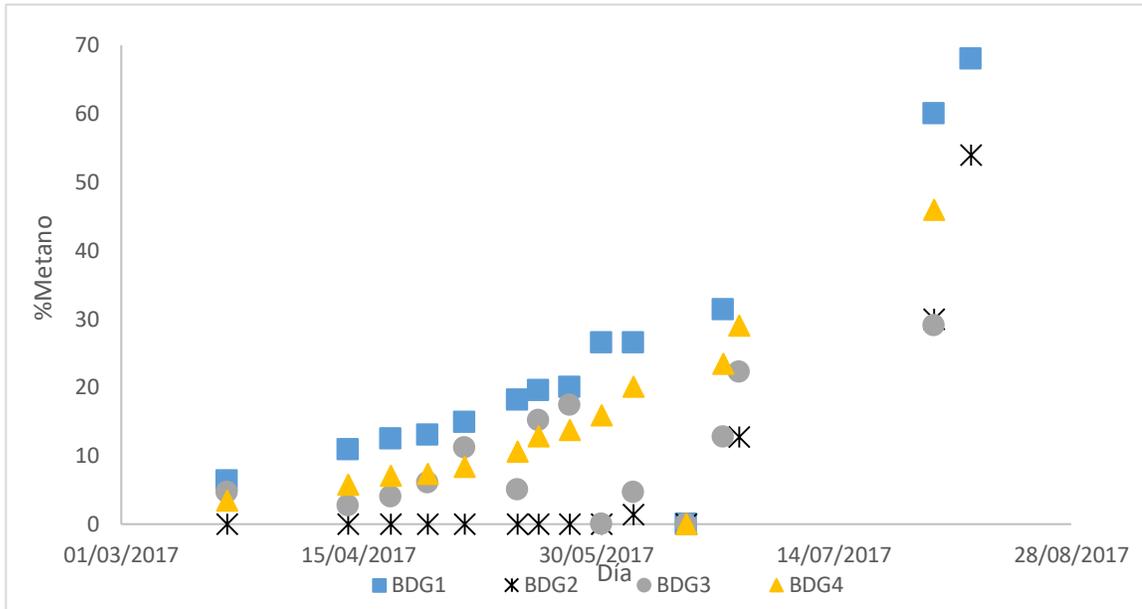
Finalmente teniendo en cuenta la relación expuesta por Flores [8] se determinó que el flujo aproximado de diésel al cual equivale los 75 m<sup>3</sup> de biogás producido es de 41.25L. Esto equivale al 1.6% del diésel que se desea reemplazar.

Los resultados previos muestran que el proceso es ineficiente en la producción de biogás, esto se debe a problemas diversos como que solo dos de los cuatro biodigestores tienen una producción de continua de biogás, la carga orgánica es menor al caso previo (por lo que es aceptable que la tasa de producción de biogás sea menor). Los resultados obtenidos serán utilizados para la implementación de las siguientes etapas del proyecto “Biogas from slaughterhouse waste water treatment for heating purpose”

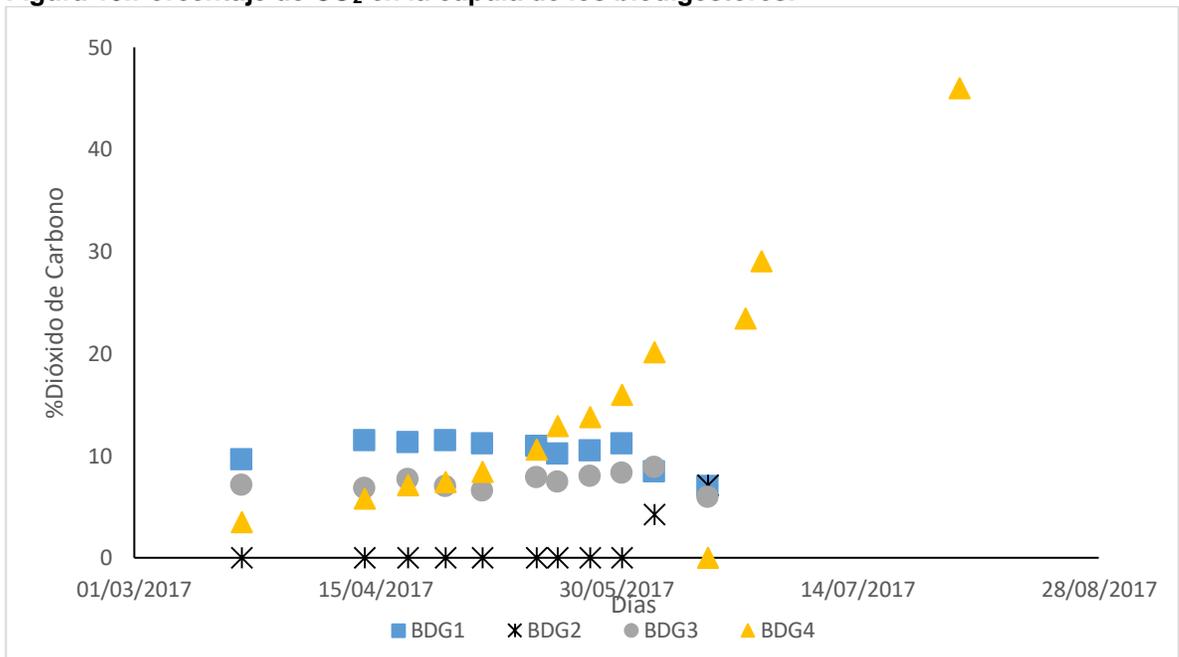
#### **2.4. CALIDAD DEL BIOGÁS**

Las Figura 14 y Figura 15 se muestra las variaciones en el porcentaje de composición del CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> respectivamente. Inicia con valores cercanos al cero, al inicio del proceso de DA. Se alcanzan porcentajes de 70% de CH<sub>4</sub> y 11% de CO<sub>2</sub> para el BDG 1, siendo este el de mayor porcentaje. Se puede apreciar que el aumento en el porcentaje de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> se realiza aproximadamente lineal. A pesar de que la producción de biogás en el biodigestor 4 es mínima el porcentaje de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> aumentaron, esto demuestra que el proceso de DA se realiza en el biodigestor. Previamente se obtuvieron, aunque no están eficiente como se esperaba. Los biodigestores 1, 2 y 3 tienen una baja concentración de CO<sub>2</sub> siendo el biodigestor 3 quien alcanza la menor concentración de metano con apenas el 30%.

**Figura 14. Porcentaje de CH<sub>4</sub> en la cúpula de los biodigestores.**



**Figura 15. Porcentaje de CO<sub>2</sub> en la cúpula de los biodigestores.**



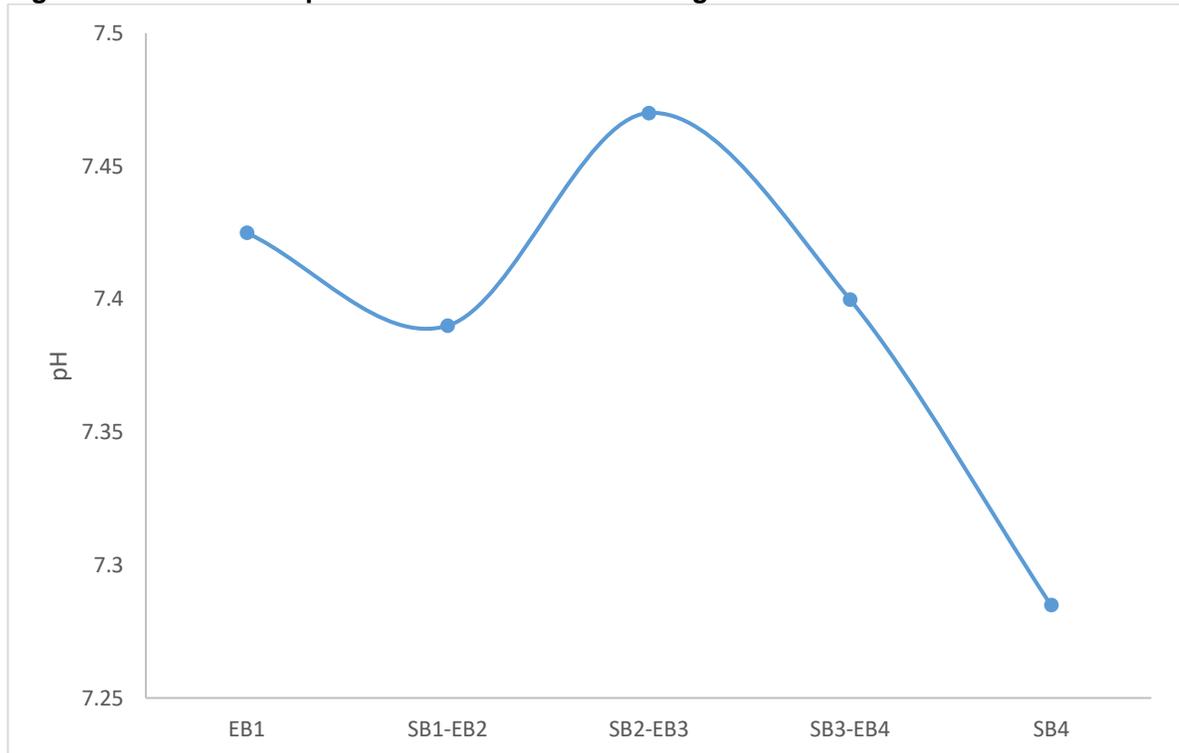
El biodigestor 4 alcanza la mayor concentración de CO<sub>2</sub>, para el caso de este biodigestor es el único que aumenta la concentración de CO<sub>2</sub>, puesto que los demás biodigestores mantienen aproximadamente constante su concentración. El

biodigestor 1 mantiene la concentración de CO<sub>2</sub> alrededor del 10% mientras el biodigestor 3 alrededor del 8%. Se puede apreciar una disminución del porcentaje de CO<sub>2</sub> tanto para el biodigestor 1 como el biodigestor 3 en los últimos días de muestreo, para estos mismos días se presentó un pequeño aumento del 8% aproximadamente en el biodigestor 2 de CO<sub>2</sub>.

## **2.5. ESTABILIDAD DEL PROCESO**

El comportamiento del pH a través del sistema de biodigestores (Figura 14) muestra que el pH se mantiene entre valores de 7.25 y 7.66. Los valores aún se encuentran dentro del rango aceptable para procesos de DA. Se observa una disminución en el pH posiblemente por la importancia de la fase acidogénica, a pesar de esto el pH se mantiene dentro del rango óptimo para beneficiar la metanogénesis. La mayor disminución de pH se lleva a cabo en el biodigestor 1, de manera contraria sucede en el biodigestor 2 que presenta el mayor aumento de pH. En general la variación del pH se da en  $\pm 0.3$ , en contra parte de otros casos en que la variación fue de  $\pm 0.2$  [8]. La variación del pH no permite observar la prevalencia entre la fase acidogénica o la metanogénica.

**Figura 16. Variación del pH dentro del sistema de biodigestores**



## 2.6. POTENCIAL ENERGÉTICO

Los factores de conversión para el potencial energético eléctrico y energético calórico son  $1.9 \text{ kWh/m}^3$  y  $3.8 \text{ kWh/m}^3$  respectivamente [18]

$$P_{EE} = 145,16 \left[ \frac{kW}{mes} \right]$$

$$P_{EC} = 290,32 \left[ \frac{kW}{mes} \right]$$

La empresa no reportó el consumo eléctrico mensual. El consumo mensual de diésel es aproximadamente 26,000 litros ( $PCI= 9.3\text{kW/L}$ ) que equivale a  $241.800\text{kW/mes}$ . A

$$\%Ahorro\ energético = 0.12$$

*Ahorro económico = 0.02*

El ahorro energético fue de 0.12% con un ahorro económico de 0.02 \$USD/mes, el bajo ahorro económico se debe a la baja producción de biogás en el sistema.

Teniendo en cuenta que los objetivos del proyecto “Biogas from slaughterhouse waste water treatment for heating purpose” son la disminución de la carga orgánica de las AR y la producción de biogás para sustituir el consumo de diésel, no se realizaron cálculos de tiempo de retorno de inversión. La empresa EMRAQ no realizó aporte económico al proyecto por lo que no fueron necesarios los cálculos mencionados anteriormente. La inversión por biodigestor se estima en alrededor de los 3600\$USD

A partir de los resultados obtenidos en la siguiente etapa del proyecto se realizarán las respectivas modificaciones en el sistema de operación del sistema de biodigestores y la implementación de un filtro anaerobio que permita mejorar la producción de biogás.

### 3. CONCLUSIONES

Se instaló un sistema de biodigestores de 400 m<sup>3</sup> para el tratamiento de las aguas de la EMRAQ-EP, dividido en cuatro biodigestores de 100 m<sup>3</sup> conectados en serie. Las dimensiones de la zanja rectangular en la que se instalaron los biodigestores fue de 2,5mx1,6mx25m. Los cuatro biodigestores se instalaron en geomembrana no reforzada con dimensiones de 2,5m x 25m.

La puesta en marcha del sistema de biodigestores comenzó con una carga promedio de 26m<sup>3</sup>. La implementación de un SAT permitió aumentar la temperatura del sistema en 3°C. La baja carga que recibe el sistema de biodigestores no permite una producción elevada de biogás en los últimos biodigestores.

Por cada m<sup>3</sup> de AR cargada al biodigestor se obtienen 1 m<sup>3</sup> de biogás en promedio. Se alcanzaron producción de biogas acumulado de 75 m<sup>3</sup>, lo que equivale a 41.75 L de diesel. El biogas obtuvo una calidad máxima del 80%. La implementación de este sistema permitió un ahorro energético del 0,12%. Aunque el rendimiento en la producción de biogas del sistema de biodigestores no era el esperado se logró disminuir la concentración de materia orgánica en un 70% aproximadamente. El comportamiento de la producción de biogás determina que el THR se puede modificar a dos días.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] OCDE/FAO, «Perspectivas Agrícolas 2014-2023,» Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Texcoco, 2014.
- [2] EMRAQ-EP, «EMRAQ-EP,» T.I.C. y Planificación - EMRAQ-EP, 2013. [En línea]. Available: <http://www.epmrq.gob.ec/>. [Último acceso: 12 Diciembre 2016].
- [3] J. Martí-Herrero, «BIOGAS FROM SLAUGHTERHOUSE WASTE WATER TREATMENT FOR HEATING PURPOSE, FIRST REPORT,» BeeGroup-CIMNE, Terrassa, 2016.
- [4] E. Chango y I. Simbaña, «Evaluación de la gestión de residuos sólidos en la planta de tratamiento de aguas residuales del camal metropolitano de Quito y propuesta de mejora,» Universidad Centrak del Ecuador, Quito, 2016.
- [5] L. Castro-Molano, H. Escalante-Hernández, O. Gómez-Serrato y D. Jiménez-Piñeros, «Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion,» *DYNA* 83, pp. 41-49, 2016.
- [6] C. Chavez, R. Castillo, L. Dendooven y E. Escamilla-Silva, «Poultry slaughter wastewater treatment with an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor,» *Bioresource Technology*, pp. 1730-1736, 2005.
- [7] A. Torkian, A. Eqbalo y S. Hashemian, «The effect of organic loading rate on the performance of UASB reactor treating slaughterhouse effluent,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 1-11, 2003.

- [8] T. Flores, «Evaluación del comportamiento del proceso de digestión anaerobia, de las aguas residuales del matadero municipal de Cochabamba Rada & asociados S.A.» Universidad del Valle, Cochabamba, 2014.
- [9] B. Manh y D. Thi, «COAGULATION IN TREATMENT OF SWINE SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER,» *GeoScience Engineering*, pp. 15-21, 2017.
- [10] C. Bustillo y M. Mehrvar, «Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 278-289, 2017.
- [11] A. Kristyo, A. Priska, M. Christwardana y D. Ariyanti, «Microbial Fuel Cells for Simultaneous Electricity Generation and Organic Degradation from Slaughterhouse Wastewater,» *International Journal of Renewable Energy Development*, pp. 107-112, 2016.
- [12] I. Zainab y M. Ali, «Biotreatment of Slaughterhouse Wastewater Accompanied With Sustainable Electricity Generation in Microbial Fuel Cell,» *Systemics, cybernetics and informatics*, pp. 30-35, 2016.
- [13] J. Vidal, C. Huiliñir y R. Salazar, «Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes,» *Electrochimica Acta*, pp. 163-170, 2016.
- [14] J. Martí-Herrero, *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*, La Paz: GTZ-Energía, 2008.

- [15] T. PERRIGAULT, V. Weatherford, J. Martí-Herrero y D. Poggio, «Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model,» *Bioresource Technology*, pp. 259-268, 2012.
- [16] APHA, AWWA y WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Whashington: American Public Health Association, 2005.
- [17] B. Jobling-Purser, S. Thai, T. Fritz, S. Estevez, R. Dinsdale y A. Guwy, «An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste,» *Water Research*, pp. 162-170, 2014.
- [18] C. Tricase y M. Lombardi, «State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations,» *Renewable Energy*, pp. 477-485, 2009.
- [19] M. Ortner, K. Leitzinger, S. Skupien, G. Bochmann y W. Fuchs, «Efficient anaerobic mono-digestion of N-rich slaughterhouse waste: Influence of ammonia, temperature and trace elements.,» *Bioresource Technology* , pp. 222-232., 2014.
- [20] L. Hyrac, R. Chardin, H. Benbelkacem, J. Bollon, R. Bayard, R. Escudié y P. Buffière, «Influence of the substrate concentration and moisture content on the specific methanogenic activity of dry mesophilic municipal solid waste digestate spiked with propionate.,» *Biorresource Technology*, pp. 822-827, 2011.
- [21] C. Caixeta, M. Cammarota y A. Xavier, «Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor,» *Bioresource Technology*, pp. 61-69, 2002.
- [22] P. Poh y C. M, «Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment,» *Bioresource Technology*, pp. 1-9, 2009.

- [23] J. Martí-Herrero, F. Flores, R. Alvarez y D. Perez, «How to report biogas production when monitoring small-scale,» *Biomass and Bioenergy*, pp. 31-36, 2016.
- [24] «AccuWeather, Inc,» 12 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.accuweather.com/es/world-weather>.
- [25] APHA, AWWA y WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Washington: Folio, 1999.
- [26] Lagos, «ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE BIODIGESTORES ANAEROBIOS,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2013.
- [27] F. Cyrille y T. Ghislain, «The determination of the most economical combination between external wall and the optimum insulation material in Cameroonian's buildings,» *Journal of Building Engineering*, pp. 155-163, 2017.
- [28] J. C. J. Martí-Herrero, «Design methodology for low cost tubular digesters,» *Bioresource Technology*, pp. 21-27, 2012.
- [29] L. Mantilla y G. Rojas, «Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino de la finca Marcella,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016.
- [30] N. Environnement, «Biogas Renewable Energy,» 01 02 2018. [En línea]. Available: [http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas\\_composition.html](http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html).
- [31] A. Adili, M. Lachheb, A. Brayek, A. Guizani y S. Ben-Nasrallah, «Estimation of thermophysical properties of lightweight mortars made of wood shavings and expanded polystyrene beads using a hybrid algorithm,» *Energy and Buildings*, pp. 133-141, 2016.

- [32] T. Perrigault, V. Weatherford, J. Martí-Herrero y D. Poggio, «Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model,» *Bioresource Technology*, pp. 259-268, 2012.
- [33] L. CASTRO, M. Carballo, J. Martí-Herrero y H. Escalante, «Monitoreo a escala real de un digester anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal,» *RedBioLAC*, pp. 33-44, 2017.

## BIBLIOGRAFÍA

ACCUWEATHER INC. Temperatura anual de la ciudad de Quito. [En línea]. AccuWeather. 2017. (Recuperado el 12 Mayo 2017) Disponible en: <https://www.accuweather.com/es/world-weather>.

ADILI, A. Estimation of thermophysical properties of lightweight mortars made of wood shavings and expanded polystyrene beads using a hybrid algorithm *Energy and Buildings*, 2016.p. 133-141.

APHA, AWWA y WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Whashington: American Public Health Association, 2005.

CAIXETA, C. CAMMAROTA M. y XAVIER, A. Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor. *Bioresource Technology*. 2002. p. 61-69.

CYRILLE, Fohagui. GHISLAIN, Techuen. The determination of the most economical combination between external wall and the optimum insulation material in Cameroonians' buildings. *Journal of Building Engineering*, 2017. p. 155-163.

CASTRO, Liliana. et al. Monitoreo a escala real de un digestor anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal,» *RedBioLAC*, 2017. p. 33-44.

CASTRO-MOLANO, Liliana. et al. Analysis of methanogenic and energetic potential from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion. *DYNA* 83, 2016.p. 41-49.

CHAVEZ, C. Poultry slaughter wastewater treatment with an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Bioresource Technology*, 2005. pp. 1730-1736.

EMRAQ-EP. Metodología de sacrificio. [En línea] T.I.C. y Planificación - EMRAQ-EP. 2013. Último acceso: 12 Diciembre 2016. Disponible en: <http://www.epmrq.gob.ec/>.

ENVIRONNEMENT, N. Biogas Renewable Energy. [En línea] 2018. Disponible en: [http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas\\_composition.html](http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html).

FLORES, Telma. Evaluación del comportamiento del proceso de digestión anaerobia, de las aguas residuales del matadero municipal de Cochabamba Rada & asociados S.A. Universidad del Valle, Cochabamba 2014.

HYRAC, L. Influence of the substrate concentration and moisture content on the specific methanogenic activity of dry mesophilic municipal solid waste digestate spiked with propionate. *Bioresource Technology*, 2011.p. 822-827.

JOBLING-PURSER, B. An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, 2014. p. 162-170.

KRISTYO, Adrianuas. et al. Microbial Fuel Cells for Simultaneous Electricity Generation and Organic Degradation from Slaughterhouse Wastewater, *International Journal of Renewable Energy Development*, 2016.p. 107-112.

MARTÍ-HERRERO, Jaime. Biogas from slaughterhouse waste water treatment for heating purpose, first report, BeeGroup-CIMNE, Terrassa, 2016.

MARTÍ-HERRERO, Jaime. Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. Bolivia: GTZ-Energía, 2008. ISBN: 978-99954-0-339-3

MARTÍ-HERRERO, Jaime. How to report biogas production when monitoring small-scale,» *Biomass and Bioenergy*, 2016.p. 31-36.

MARTÍ-HERRERO, Jaime. Design methodology for low cost tubular digesters,» *Bioresource Technology*, 2012..p. 21-27

MANH, Bui. THI ,Duong. Coagulation in treatment of swine slaughterhouse wastewater. *GeoScience Engineering*. 2017, p.15-21.

MANTILLA, Laura. ROJAS, Gustavo. Implementación de un reactor rural para la digestión anaerobia de estiércol bovino de la finca Marcella,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2016.

OCDE/FAO. Perspectivas Agrícolas 2014-2023. Texcoco. Universidad Autónoma Chapingo (UACH),2014.

ORTNER, M. et al. Efficient anaerobic mono-digestion of N-rich slaughterhouse waste: Influence of ammonia, temperature and trace elements. *Bioresource Technology*,2014. p. 222-232.

PERRIGAULT, Thubault. et al .Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 2012.p. 259-268.

POH, P.et al. Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource Technology*, 2009. p. 1-9.

TRICASE, C. LOMBARDI, M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations. *Renewable Energy*, 2009. p. 477-485.

VIDAL, Jorge. HUILIÑIR, Cesar y SALAZAR, Ricardo. Removal of organic matter contained in slaughterhouse wastewater using a combination of anaerobic digestion and solar photoelectro-Fenton processes. *Electrochimica Acta*, 2016. p. 163-170.

ZAINAB, Ismail. ALI, Mohammed. Biotreatment of Slaughterhouse Wastewater Accompanied With Sustainable Electricity Generation in Microbial Fuel Cell. *Systemics, cybernetics and informatics*, 2016. p. 30-35.

## ANEXOS

### Anexo A. Autorización de uso de datos



## USO DE DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Jaime Marti Herrero  
PhD physical Sciences  
Assistant Research Professor  
Centre Internacional de Metodologies Numèriques en Enginyeria (CIMNE)  
Universitat Politècnica de Catalunya, España  
Email: [jaimemarti@cimne.upc.edu](mailto:jaimemarti@cimne.upc.edu)  
Cel\_ (+593) 098 570 3726

### AUTORIZO

A la Universidad Industrial de Santander (UIS), ente de Educación Superior reconocida por el Ministerio de Educación Nacional mediante Decreto 583 de 25 de Febrero de 1947, con NIT. 890.201.213-4 y domicilio principal en la ciudad de Bucaramanga. Para que para que haga uso de los siguientes datos e información derivada de la investigación denominada "Biogas from Slaughterhouse waste water treatment for heating purpose" realizada en la ciudad de Quito-Ecuador bajo la supervisión del Centre Internacional de Metodologies Numèriques en Enginyeria (CIMNE) y dirigido por mí:

- Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales del frigorífico
- Diseño de los biodigestores
- Resultados de la implementación de los biodigestores en variables de digestión Anaerobia

La UIS podrá utilizar la información con motivos académicos y para el soporte del trabajo fin de carrera de la estudiante ERIKA ROCIO SUAREZ BARBOSA de la escuela de Ingeniería Química, igualmente la universidad podrá publicar y reproducir la información con motivos académicos sin beneficio económico. La autorización no presenta ninguna limitación geográfica ni limitación por tiempo. Todo lo anterior bajo las normas internacionales sobre propiedad intelectual que sean aplicables.

Para constancia se firma en Quito el 2 de Junio de 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jaime Marti-Herrero', is written over a horizontal line.

Jaime Marti-Herrero, PhD  
Assistant Research Professor, CIMNE

*Anexo B. Ficha técnica geomembrana*

Tabla 5. Ficha técnica de la geomembrana. Fuente: Biodigestores Ecuador

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	VALOR
Gramaje		g/m <sup>2</sup>	1400
Espesor		mm	1000
Resistencia a la tracción	ASTM D-882	MPa	Longitudinal: 9 Transversal: 10
Alargamiento a la rotura	ASTM D-882	%	Longitudinal: 240 Transversal: 220
Resistencia al rasgado	ASTM D-1004	N	Longitudinal: 50 Transversal: 52
Resistencia al punzonamiento	ASTM D-2582	N	300
Estabilidad dimensional	ASTM D-1204		A 110°C durante 5 min es menor al 3%
Volatilidad máxima perdida	ASTM D-1203	%	0.6
Resistencia hidrostática	ASTM D-794	psi	110
Resistencia al despegue en el sellado	ASTM D-413	kg/cm <sup>2</sup>	
Temperatura de trabajo			Máximo 70°C
Resistencia Química			Ácidos, bases, metales pesados y petróleo crudo

Anexo C. Registro fotográfico



Proceso de sacrificio



Biodigestor No. 1



Separador de sólidos



Tanque de homogenización II