

INFORME TÉCNICO DEL CONCEPTO:

Evaluación del biodigestor tubular en la I.E.A. de Guacavía, Cumaral-Meta

Juan Nicolás Ariza Casallas, Deibi Fabian Pinzón Giraldo, Christian José Rojas Reina, Jorge Eliécer Pardo Mayorga, Yésica Natalia Mosquera Beltrán

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERIA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

Resumen

En el presente concepto técnico solicitado por la I.E.A. de Guacavía se evaluó el estado del biodigestor tubular anaerobio de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía, localizada en el municipio de Cumaral, Meta. Este dispositivo de biodigestión fue diseñado para ser alimentado con las excretas porcinas provenientes de un corral de cerdos (actualmente con una población de 16 cerdos). Sin embargo, se encontraba en un estado de abandono desde hace cinco años aproximadamente, por lo que las excretas producidas no son tratadas adecuadamente y son vertidas al aire libre, generando impacto ambiental negativo. Con la finalidad de poner en funcionamiento el sistema de biodigestión se llevó el siguiente procedimiento: Fase 1, que comprendió el diagnóstico del sistema: iniciando el reconocimiento de la zona de estudio, la georreferenciación y evaluación del estado actual del biodigestor y sus componentes, para determinar las acciones de rehabilitación del sistema. Seguidamente, en la Fase 2, de acuerdo a los resultados se analizaron las actividades necesarias para el rediseño del biodigestor, considerando no la población actual de cerdos, sino los parámetros óptimos para el funcionamiento de acuerdo con las actuales dimensiones de la bolsa plástica que constituye el biodigestor, para estimar la biomasa de excretas necesaria, y en consecuencia la población idónea de cerdos. En la Fase 3 se realizó un montaje a escala laboratorio en la Universidad Santo Tomás, con el fin de determinar el potencial de biogás real de las excretas producidas y, de estimar la producción de biogás del sistema en condiciones óptimas.

Se encontró que el sistema de biodigestión presenta problemas debido al nivel freático del lugar donde se encuentra excavada la fosa del biodigestor, ocasionando una disminución de la temperatura de la bolsa plástica y, por consiguiente, afectando la principal ventaja del sistema en esta región, la temperatura ambiente dentro del rango (Aprox. 30 °C). Por ello se hacen recomendaciones para mitigar este problema y no se vea afectada la temperatura. Ya resuelto este problema se recomiendan los valores de entrada del sistema para una operación óptima, expresado en la cantidad de cerdos que debería tener la granja porcícola para una alimentación de excretas estable, suponiendo una proporción de agua de 1:7 en la mezcla entrante al sistema del biodigestor.

Palabras Clave: Biogás, excretas porcinas, biodigestor, energía renovable.

1. Introducción

El uso del biogás se presenta como una solución a los problemas de desperdicios orgánicos originados en establecimientos ganaderos, granjas porcícolas, industrias alimenticias, industrias forestales, aguas residuales y desperdicios orgánicos de las ciudades. Las energías renovables con el paso del tiempo han asumido un papel importante en la producción de energía y tratamientos de desechos, y con el pasar de los años el papel que representará será mucho más importante, para que el aprovechamiento y usos de algunas fuentes contribuyan al desarrollo sostenible de las poblaciones y satisfacer la demanda energética (Beltrán et al., 2015).

Dentro de las energías alternativas, los biodigestores enmarcados en el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola, actualmente son una estrategia que se está abriendo paso en el departamento del Meta. Esto debido a su gran potencial y a la gran cantidad de residuos agrícolas disponibles en el departamento, susceptible de transformarse en un biocombustible (biogás) y un acondicionador de suelo (abono). De esta forma se mitigan los efectos negativos de las descargas de residuos orgánicos y al mismo tiempo se disminuye la huella de carbono al reemplazar combustibles fósiles, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

En los últimos años en el departamento del Meta aumentó en gran medida la producción de carnes, principalmente la de cerdo (porcino) con un 32,8% han pasado de 227.245 cabezas en 2018 a 304.889 en 2019 (Porkcolombia, 2019). Sin embargo, aunque el crecimiento acelerado de la industria porcícola es beneficiosa para la economía del departamento, también origina una serie de inconvenientes de orden ambiental, dentro de los cuales el principal problema es el mal manejo en la disposición final de las aguas residuales y los residuos sólidos ordinarios y especiales (Gonzalo, 2011). Es de destacar que los desechos sólidos producidos por esta actividad presentan una alta carga orgánica entre 10.000 a 30.000 ml/l (Cubillos & Huertas, 2019), la cual es difícil de tratar a través de un tratamiento convencional de aguas residuales debido al volumen generado y a sus características físico-químicas, por lo que es necesario la implementación de tecnologías que puedan soportar altas cargas orgánicas, siendo la digestión anaerobia una de ellas (Gonzalo, 2011). Es por ello que el uso de biodigestores anaerobios se plantea como opción para el tratamiento de este tipo de residuos.

La Institución Agrícola Educativa de Guacavía del municipio de Cumaral-Meta cuenta con una porqueriza la cual alimenta un biodigestor tubular anaerobio que actualmente está en abandono por diversas fallas presentadas (hace 5 años aproximadamente), por lo tanto es de gran importancia realizar un proyecto de adecuación del biodigestor tubular para su correcto funcionamiento, ya que allí se generan aguas residuales con materia orgánica que no están siendo tratadas y están siendo vertidas a un afluente cercano de la Institución, lo cual genera un impacto ambiental negativo, eso sin mencionar la generación de malos olores que afectan las actividades propias de la institución.

2. Planteamiento del problema

En las actividades de la industria porcícola, han surgido problemas relacionados con la generación de susdesechos y aguas residuales, estas aguas pueden alcanzar grandes volúmenes constituyendo un serio problema respecto a su confinamiento y manejo, por los impactos ambientales negativos que ocasionan sobre las fuentes de agua, y como tal, son tal vez una de las actividades agropecuarias más vigiladas por las autoridades ambientales (Cervantes & Saldívar-Cabres, 2007).

Al no ser tratadas estos tipos de residuos de granjas porcícolas representan un serio foco de infección, emiten cantidades importantes de amoníaco y ácido sulfhídrico a la atmósfera; además, importantes escurrimientos terminan infiltrando altas concentraciones de amonio a los acuíferos de la zona colindante.

Las aguas residuales generadas de granjas porcícolas son difíciles de digerir, por lo que su tratamiento no se debe abordar de una manera simplista. En efecto, se necesitan de tecnologías adecuadas para dar un tratamiento y disposición adecuada a este tipo de descargas (Cervantes & Saldívar-Cabres, 2007)

La Institución Educativa Agrícola de Guacavía cuenta con un sistema de tratamiento para los desechos de la porqueriza, el cual consiste en un biodigestor tubular anaerobio. La porqueriza tiene una población actualmente de diez y seis (16) cerdos. Sin embargo, el sistema no se encuentra operativo (Figura 1); dejó de funcionar correctamente hace aproximadamente cinco años, principalmente por colapso de las cajas de entrada al sistema (Cubillos & Huertas, 2019).

La contaminación generada por una granja porcina afecta principalmente al microambiente (la granja misma) y en este caso al ambiente en general de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía. Se ha visto que la exposición a los gases producidos (amoníaco, sulfuro de hidrógeno, metano y bióxido de carbono) los cuales representa riesgos directos a la salud de las personas que se encuentren cerca de las porquerizas, además de afectar el desarrollo de los porcinos. Esto es debido a que el amoníaco es irritante, lo que hace que se produzca malestar en los cerdos, constatando una disminución (del 12 al 30%) en la ganancia diaria de peso de cerdos alojados. El amoníaco proviene del nitrógeno excretado principalmente en la orina (85%) y en las heces (15%) (Landin, 2006).

La Institución Agrícola de Guacavía del municipio de Cumaral-Meta cuenta con una porqueriza la cual alimenta un biodigestor tubular anaerobio que actualmente está en abandono por diversas fallas presentadas (hace 5 años aproximadamente), por lo tanto es de gran importancia realizar un proyecto de adecuación del biodigestor tubular para su correcto funcionamiento, ya que allí se generan aguas residuales con materia orgánica que no están siendo tratadas y están siendo vertidas a un afluyente cercano de la Institución, lo cual está generando un impacto ambiental negativo, eso sin mencionar la generación de malos olores que afectan las actividades propias de la institución.



(A)



(B)



(C)

Figura 1: Estado actual del biodigestor de la Institución Educativa Agropecuaria de Guacavía.

(A): cámara de descarga; (B): tanque de recolección; (C): reactor. Fuentes: Autores.

Las fallas del sistema hacen que los desechos generados por estos animales (materia orgánica y demás) no tengan un procesamiento adecuado produciendo malos olores y descarga orgánica inadecuada en un cuerpo de agua cercano a la I.E.A. de Guacavía, esto genera un impacto ambiental negativo debido a la gran carga orgánica y nitrogenada que presentan este tipo de residuo, además del fósforo y el potasio, que aunado a la gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles que son los que generan los malos olores (Landin, 2006), estos compuestos pueden ocasionar molestias y enfermedades respiratorias a la comunidad estudiantil de la I.E.A de Guacavía, ya que esta cuenta con un internado en las cercanías a la porqueriza debido a esto las actividades de producción porcina son de las más vigiladas por las autoridades ambientales, por el grado de contaminación que pueden ocasionar (Cervantes & Saldívar-Cabrales, 2007).

2.1. Formulación entorno al problema

2.1.1. Hipótesis

Existen problemas estructurales u operacionales en el sistema de biodigestión de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía

(Ho): Si la hipótesis es positiva se deberán encontrar los problemas estructurales u operacionales que impiden el buen funcionamiento de biodigestión

(H1): Siendo negativa la hipótesis, no serían la estructura u operación del sistema la causa de mal funcionamiento del biodigestor. En este caso serían aspectos biológicos del sustrato lo que ocasionarían su mal funcionamiento.

A continuación, se propone una pregunta referente a la problemática planteada:
¿Cuáles son los factores que determinan el mal funcionamiento del biodigestor tubular de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía?

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Evaluar el diseño para posibles mejoras del biodigestor tubular anaerobio usado para el tratamiento de las excretas porcinas de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía en el Municipio de Cumaral, Meta.

3.2.Objetivos específicos

- Diagnosticar el estado actual del sistema del biodigestor de la Institución Educativa Agrícola de Guacavía.
- Diseñar las medidas a realizar para recuperar la operatividad del sistema del biodigestor de la I.E.A. de Guacavía.
- Determinar en el laboratorio el potencial de las excretas de la I.E.A. de Guacavía, para determinar la producción de biogás para un óptimo funcionamiento del biodigestor de la I.E.A. de Guacavía.

4. Metodología

Para la ejecución del proyecto, se propuso una metodología basada en tres fases principales, teniendo en cuenta los objetivos que se plantearon inicialmente.

4.1.Fase 1: Reconocimiento de la zona de estudio y diagnóstico del estado actual del sistema de biodigestor

4.1.1. Reconocimiento de la zona de estudio

En la realización del recorrido por la zona de estudio se identificó el área porcícola y del sistema del biodigestor, se georreferenció, la zona de la institución y zona donde se encuentra el área porcícola.

4.1.2. Diagnóstico del estado actual del sistema de funcionamiento del biodigestor

Inspección del sistema de biodigestión (biodigestor tubular) y de alimentación del mismo (porquerizas y sistema de evacuación de residuos de las mismas). Estado actual de cada

componente del sistema del biodigestor, análisis de posibles modificaciones en base a los parámetros de diseño óptimos para este tipo de estructura.

4.1.3. Caracterización de excretas

Monitoreo de las características de las excretas producidas de las cuales se calculan los parámetros de funcionamiento para que estos se encuentren en un punto óptimo con los parámetros de diseño del biodigestor. Esto implica la caracterización del sustrato en cantidad (kg/día) y calidad actual (% ST y %SV). Los respectivos análisis se hicieron en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás-Villavicencio.

Para la caracterización de la biomasa se tomaron muestras de excretas en la porqueriza de la I.E.A de Guacavía y fueron transportadas a los laboratorios de la USTA Villavicencio para su análisis, la Tabla 1 muestra el protocolo desarrollado tomado de (Alberto et al., 2013)

Tabla 1: Caracterización de excretas

Proceso	Descripción	Equipos utilizados	Figura
1.	Se pesaron cuatro capsulas vacías se rotularon, se le adicionaron 50g de excretas, fueron pesadas nuevamente Y se introducen en el horno de secado a 105 °C durante 2 horas.	• Balanza analítica • Horno de secado	
2.	Transcurridas las 2 horas son puestas a enfriar en el desecador y se pesa la capsula con el residuo seco.	• Desecador • Balanza analítica	
3.	Se hace una mezcla 1:7 con excretas y agua (100g de excretas y 700 ml de agua). Se le mide el pH,	• Multiparámetro • pH-metro	

conductividad y es puesta a congelar.



4. Se pesan 4 crisoles vacíos se rotulan, se le adiciona la mitad a cada crisol de las excretas salidas del horno de secado, son pesadas nuevamente y puestas en la mufla a 450 °C durante 1 hora.

- Balanza analítica
- Mufla



Los análisis de parámetros se determinaron mediante la ecuación 1 y 2, los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles para las excretas, con el fin de evaluar la capacidad de degradación durante el proceso de digestión anaerobia.

Ecuación 1. Cálculo de solidos totales (American Public Health Association, 1992)(1)

$$\text{Solidos Totales (\%ST): } \frac{(\text{Peso capsula} + \text{residuo})}{(\text{Peso capsula} + \text{masa humeda})} * 100$$

Ecuación 2. Cálculo de solidos volátiles (American Public Health Association, 1992)(2)

$$\text{Solidos Volátiles (\%SV): } \frac{[\text{Peso crisol} + \text{masa seca (105°C)}] - [\text{Peso crisol} + \text{cenizas}]}{[\text{Peso crisol} + \text{masa seca (105°C)}] - [\text{Peso crisol}]} * 100$$

4.2.Fase 2: Diseño de medidas para la recuperación del biodigestor de la Institución

4.2.1. Reconocimiento del estado del biodigestor

Para el reconocimiento de las fallas que impiden el funcionamiento del biodigestor fue necesario realizar un diagnóstico general, inicialmente con una inspección visual y reconocimiento de todos los elementos que están incluidos en la porqueriza.

La siguiente actividad realizada fue un levantamiento topográfico y una medición de todas las áreas de la zona de estudio (biodigestor) para la elaboración de un plano, para así determinar lo siguiente: (i) área por cada compartimiento de la porqueriza, (ii) ruta de recolección de aguas, (iii) la pendiente de los tanques de almacenamiento, como estaban estas pendientes dentro de la porqueriza y en cada una de las recamaras, (iv) profundidad de las cámaras de recolección, taques de almacenamiento y cámara de descarga. Teniendo esta información se procede a verificar si la pendiente estaba cumpliendo con los mínimos requeridos para el desplazamiento de excretas desde la porqueriza a la cámara de recolección y los respectivos análisis del estado de funcionamiento de las diferentes estructuras ya sean para rediseñarlas o cambiarlas.

Conociendo las fallas del sistema se llevaron a cabo las acciones necesarias, ya sean de tipo operativas y/o diseño para mejorar el sistema hasta su funcionalidad. Esta renovación concierne a:

- Sistema de alimentación porqueriza –tanque de alimentación del biodigestor
- Agua de lavado de las porquerizas
- Adecuación del área circundante del biodigestor y la fosa del mismo
- Tanque de salida del efluente del biodigestor
- Sistema de salida del biogás

4.3. Fase 3: Determinación del potencial de las excretas mediante montaje experimental (a escala laboratorio) dela porqueriza de la I.E.A de Guacavía

4.3.1. Toma de muestras (excretas).Para el montaje experimental

Se procede con la toma de muestras en la I.E.A. de Guacavía, se transportan a los laboratorios de la Universidad Santo Tomás en un embalaje que garantiza una baja temperatura para evitar la degradación previa al montaje en el laboratorio.

4.3.2. Determinación de potencial de biogás mediante montaje experimental

El siguiente diseño experimental (ver Figura 2) se realizó en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio. Por medio de estos análisis experimentales se determinó la factibilidad de las excretas para producir biogás en las condiciones locales con el sustrato disponible en las I.E.A. de Guacavía (Excretas porcinas). De esta forma se podrá estimar de una manera confiable cuanto se producirá de biogás una vez las fallas estructurales sean corregidas y puede realizarse el arranque del biodigestor.

El fin del montaje en el laboratorio fue determinar el potencial de biogás de los sustratos de la I.E.A. de Guacavía (Excretas porcinas) y su comportamiento durante el proceso anaerobio. El reactor consiste en un contenedor de 1 L que funciona como biodigestor, este recipiente se encuentra herméticamente sellado y conectado a un segundo contenedor. El biogás remanente fluye al segundo contenedor donde desplaza un líquido inerte, para obtener una medición del gas producido a temperatura ambiente. El reactor se mantuvo en régimen mesofílico (37 °C), durante la digestión, la cual se da concluida, cuando el volumen diario producido sea menor al 1 % de la mayor cantidad diaria producida desde el inicio. Debido a la variabilidad de los sustratos en sus composición, las pruebas se realizaron por triplicado para obtener valores promedios de la producción de biogás (Rojas et al., 2018).

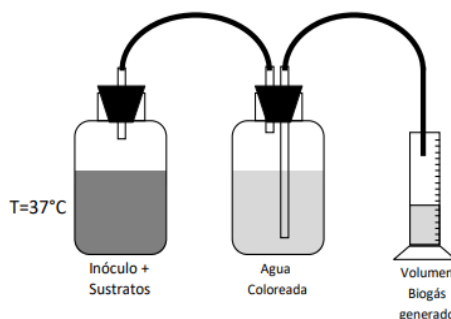


Figura 2: Montaje experimental para la determinación de biogás a escala de Laboratorio. (Rojas et al., 2018)

El montaje de los reactores realiza cómo se observa en la Tabla 2. Para garantizar la mezcla completa, se utilizó inóculo (bacterias anaerobias), obtenidas de un reactor en operación

y una porción de excretas porcinas, lo cual proporciona una densidad y condiciones adecuadas para las bacterias anaerobias (Rojas et al., 2018).completadas con agua hasta 700 ml.

Tabla 2: Composición de contenido de los digestores (700 ml) en el laboratorio.

N°	CONTENIDO	INÓCULO	EXCRETAS
1	Inoculo	200 ml	0
2	Ex. Porcinas	200 ml	1 g
3	Ex. Porcinas	200 ml	1 g
4	Ex. Porcinas	200 ml	1 g

Nota. Fuente: autores

4.3.3. Cálculos y análisis de resultados de los laboratorios.

El potencial de biogás se calculó a partir de las tres (3) corridas, utilizando la ecuación 3 (se promediaron los resultados) usando la siguiente ecuación.

Ecuación 3. Producción de biogás (American Public Health Association, 1992)

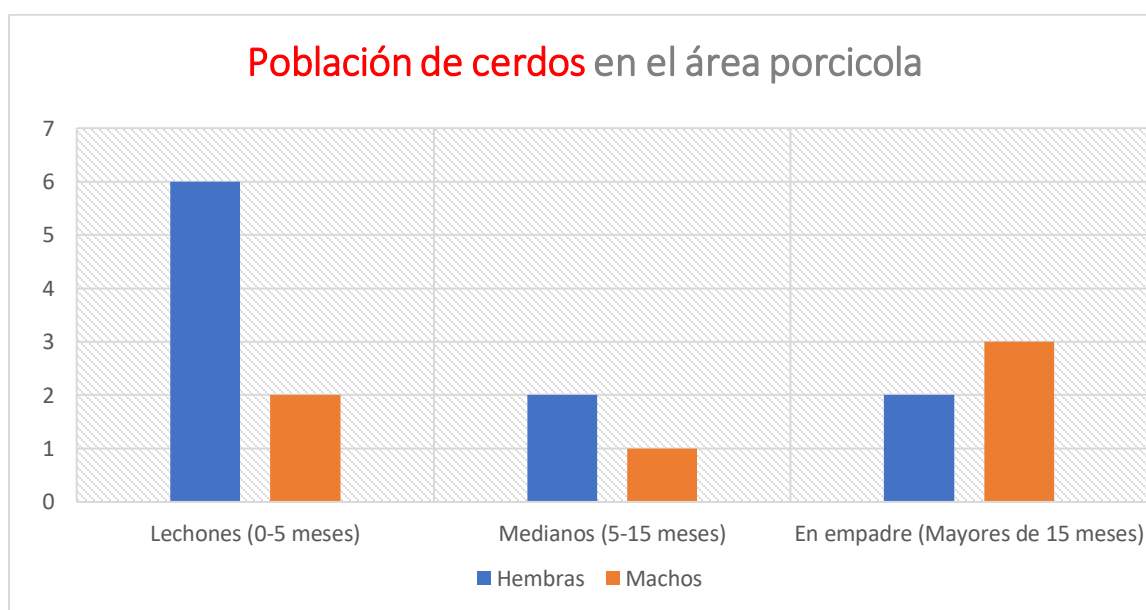
$$\text{Producción de biogás } \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\%ST}{100} * \frac{\%SV}{100} * \text{Tasa de Biogás} \left(\frac{m^3}{Kg SV} \right) * \text{Excretas añadidas} \left(\frac{kg}{d} \right)$$

5. Resultados y Discusión

5.1.Fase 1: Reconocimiento de la zona de estudio y diagnóstico del estado actual del sistema de biodigestor

5.1.1. Reconocimiento de la zona de estudio:

Como resultado del reconocimiento del sistema de biodigestión de la I.E.A. de Guacavía, se revisaron las rutas de entrada y salida al biodigestor, el área porcícola junto con el sistema debiodigestión, se tomaron las coordenadas de la ubicación (474100,67 Norte-664099,56 Este) del reactor. En el área porcícola se identificaron 16 cerdos (Grafica 1), en su momento eran 10 hembras (2 en empadre, 2 en peso promedio y 6 lechones) y 6 machos (3 en empadre, 1 en peso promedio y 2 lechones).



. Gráfica 1: Cantidad cerdos identificados en el reconocimiento de la zona de estudio.

Fuente: autores.

5.1.2. Diagnóstico del estado actual del sistema de funcionamiento del biodigestor

5.1.2.1. Inspección de la porqueriza: La porqueriza cuenta con 7 corrales, donde cada uno cuenta con puertas metálicas, estructura de alimentación, bebederos que activan los cerdos con su boca y canales para la evacuación de orina y las excretas en el momento que son lavadas las porquerizas, estos canales conectan con las cámaras de recolección, además, dos de estos

corrales cuentan con una estructura metálica que facilita el apareamiento de los porcinos. En estos corrales los animales son divididos según su estado: si se encuentran en crianza, monta o crecimiento para llevar a la madurez de empadre.

Esta porqueriza estructuralmente se encuentra en estado óptimo y tiene sus propios tanques de almacenamiento de agua, energía, almacén para los materiales y comida de los cerdos. En resultado se concluyó que la estructura y condiciones son adecuadas para cada etapa de la producción porcícola, asegurando el correcto desarrollo y sanidad que se necesita para este tipo de producción.

5.1.2.2. Inspección del biodigestor tubular anaerobio

Esta inspección se inició con conocimiento de la zona y estructura total del biodigestor la cual se encontraba en estado de abandono como indicaban los estudios previos, (un tiempo de 5 años, aproximadamente) (Cubillos & Huertas, 2019).

Esta inspección se dividió en los siguientes componentes: Zona y estructura de cobertura del biodigestor, cámara de recolección 1, cámara de recolección 2, tanque de almacenamiento 1, Fosa, Reactor, tanque de almacenamiento 2, tanque de almacenamiento 3 y tuberías.

- **Zona y estructura de cobertura:** La zona del biodigestor se encontraba en total abandono puesto que la cobertura vegetal cubría en su totalidad la estructura del biodigestor y alrededores, además se identificaron filtraciones de excretas al suelo de la zona aledaña del biodigestor.



Figura 3: Porqueriza de la I.E. A. de Guacavía, (A): interior de la porqueriza;
(B): tanque de abastecimiento de agua. Fuente: autores

Para observar el punto de la fuga se hizo una limpieza manual con machetas, eficientemente se evidencia el lugar donde se presentaban las filtraciones de excretas, así como fallos en la estructura como algunas tejas corridas que dejan desprotegido el biodigestor y los tanques de almacenamiento, (que no contaban con tapas de concretos facilitando que se modifique la relación aguas/excretas). También se notó la presencia de vectores como zancudos, moscos y roedores, que se reproducían y anidaban en la zona debido al mal manejo de las excretas y los malos olores que se presencian en el lugar y lugares aledaños a la estructura; debe ser pintada la estructura cobertera, esta estructura está elaborada de madera de dos metros de altura y tres metros de ancho, con bases de concreto y se encuentra en buen estado.

Estas filtraciones de excretas y aguas residuales en el lugar, afectan los cuerpos de aguas y pozos sépticos (Garzón-Zúñiga & Buelna, 2014), que están aledaños y dentro de la I.E.A de Guacavía, debido a que gran parte del agua utilizada en la institución son extraídas de estos pozos pertenecientes a la institución.



(A)



(B)

Figura 4: Limpieza realizada al biodigestor. (A): Estado del biodigestor antes de la limpieza; (B): Resultado de la limpieza al biodigestor. Fuente: autores.

- **Cámara de recolección 1:** Esta cámara es elaborada con ladrillos de grosor de 0,11m, con un ancho de 0,83m, un largo de 0,90m y una profundidad de 0,56m y una tapa de concreto, esta cámara se encuentra a la salida de la porqueriza. La cámara se encontraba llena en su totalidad (ver Figura 5) de excretas y con una parte de su estructura cayéndose.



Figura 5: Estado de la cámara de recolección 1, fuente: autores.

- **Cámara de recolección 2:** Igualmente esta cámara presentaba las medidas que la cámara 1 al igual que sus mismas características, donde se observaron los mismos problemas tanto estructurales.



Figura 6: Estado de la cámara de recolección 2, fuente: autores.

- **Tanque de almacenamiento 1:** El tanque está elaborado con ladrillos de grosor de 0,11m, con un ancho de 1,5m, un largo de 1 m y una profundidad de 1,2 m y una tapa de concreto, este tanque es alimentado con dos tuberías, específicamente con las de la cámara de recolección 1 y 2, además tiene una lámina de agua estancada bastante alta la cual llega al nivel del tubo presente en él tanque, que conecta al tanque con el reactor. Las tuberías provenientes de las cámaras están obstruidas debido a que estas se encuentran rebosadas y aun así no hay flujo de excretas ni agua, el flujo del tanque al reactor es óptimo.



Figura 7: Estado actual del tanque de almacenamiento 1. Fuente: autores.

Fosa: Esta fosa es el lugar donde se encuentra el reactor, está entre el tanque de almacenamiento 1 y 2, con las siguientes dimensiones: 9 m de largo, 1,7 m de ancho sin ningún tipo de recubrimiento; se encuentra inundada (Figura 8) y con basura, por ende, para su diagnóstico se necesitaba retirar el agua, los residuos del lugar y retirar el plástico del reactor. La inundación se atribuye a posibles fugas en el reactor y, las lluvias constantes en la zona durante el tiempo de estudio (Marín & Hernández, 2019). Para evitar el exceso de aguas por lluvias, se corrigió la posición de algunas tejas de la estructura de cobertura y se hicieron zanjas para que funcionara como canales de agua lluvia sin embargo el nivel de agua aumentó.



Figura 8: Estado de la fosa del biodigestor. Fuente: autores.



Figura 9: Elaboración del desagüe alrededor de la fosa del biodigestor, fuente: autores.

- **Reactor:** El reactor está elaborado de polietileno con las siguientes dimensiones largo de 9 m largo y 1,6 m de ancho (desinflado). Se observó y parece no almacenar el gas que se produce, además por el crecimiento y decrecimiento del plástico, parece tener fuga, el

plástico no se pudo retirar hasta que la fosa se seque en su totalidad, esta no cuenta con una estructura instalada para la medición y aprovechamiento del biogás.

- **Tanque de almacenamiento 2:** Este tanque está elaborado con ladrillos de 0,11m de ancho, y de 1,5 m cada lado, una profundidad de 1,3 m y una tapa de concreto, este tanque es alimentado con una tubería, específicamente la proveniente del reactor. A su vez este tanque alimenta el tanque de almacenamiento 3 a través de una tubería, estas tuberías presentes están en un estado óptimo para el funcionamiento del biodigestor.



Figura 10: Estado del tanque de almacenamiento 2. Fuente: autores.

- **Tanque de almacenamiento 3:** Está elaborado con ladrillos de grosor de 0,11m, con un ancho y un largo de 2,37 m y una profundidad de 1,85 m. este tanque es alimentado con una tubería, del tanque de almacenamiento 2. Esta cámara tiene un tubo de salida, la cual da al suelo de la zona, para evitar que el agua de este se devuelva al tanque de almacenamiento 2, estando a menor altura que la del tanque, para la puesta en marcha deberá vaciarse para observar detalladamente su estructura.



Figura 11: Estado de la cámara de descarga. Fuente: autores.

- **Tuberías:** En cuanto a las tuberías se observaron todas en buen estado, el problema influye en el abandono del sistema del biodigestor, algunas de las tuberías como las de salida de las cámaras de recolección se observan obstruidas.

En la Tabla 3 se encuentran las medidas de las estructuras correspondientes al biodigestor registradas durante esta fase del procedimiento de diagnóstico, donde se les asignó el siguiente estado:

Funcional: Estructura en buen estado y no necesita reparación

Recuperable: Estructura en buen estado pero que necesita un mantenimiento y/o arreglo.

No adecuado: Estructura que quede cambiar su diseño y/o estructura totalmente.

Desconocido: Estructura que no pudo ser evaluada por condiciones del terreno y/o estructura.

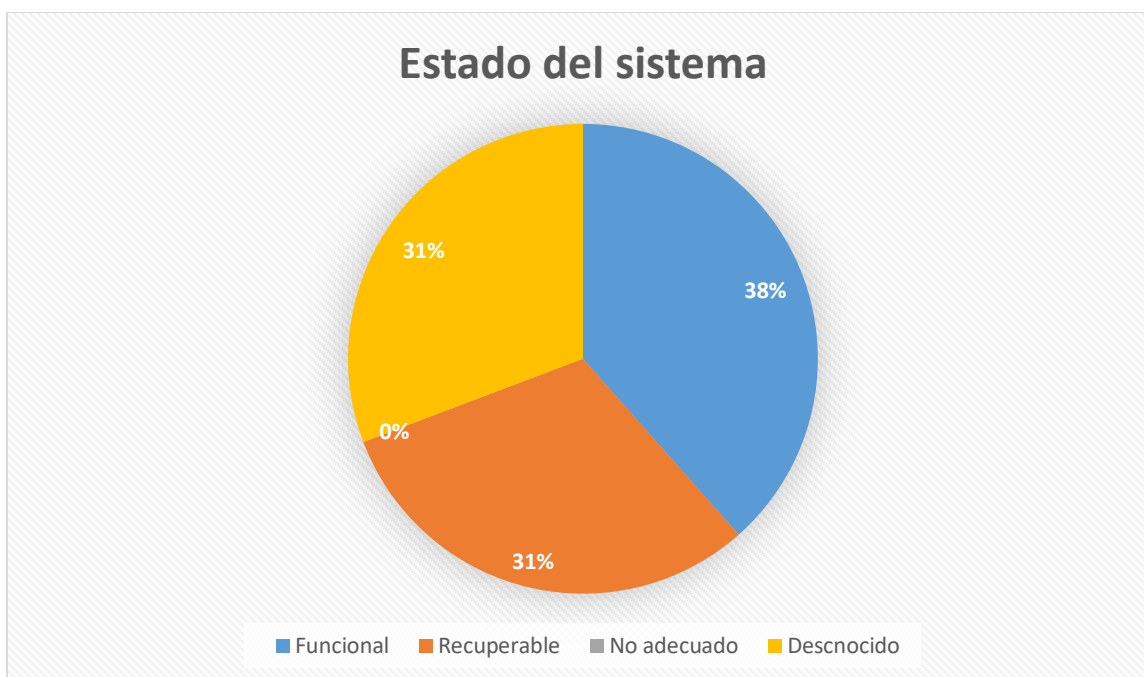
Tabla 3: Medidas de los componentes del sistema del biodigestor.

Estructura	Medidas	Estado
Cámara de recolección 1	Largo: 0,9 m Ancho: 0,83 m Profundidad: 0,56 m	Recuperable
Tubería de cámara de recolección 1 a tanque de almacenamiento 1	Largo: 6,60 m Diámetro: 8 pulgadas	Desconocido
Cámara de recolección 2	Largo: 0,9 m Ancho: 0,83 m Profundidad: 0,56 m	Recuperable
Tubería de cámara de recolección 2 a tanque de almacenamiento 1	Largo: 6,60 m Diámetro: 8 pulgadas	Desconocido
Tanque de almacenamiento 1	Largo: 1 m Ancho: 1,5 m Profundidad: 1,2 m	Recuperable
Tubería de tanque de almacenamiento 1 a reactor	Largo: 0,60 m Diámetro: 10 pulgadas	Funcional
Reactor	Largo: 9 m Ancho: 1,6 m	Desconocido
Fosa	Largo: 9 m Ancho: 1,7 m Diseño: No recubierto	Desconocido
Tubería del reactor al tanque de almacenamiento 2	Largo: 0,6 m Diámetro: 10 pulgadas	Funcional
Tanque de almacenamiento 2	Largo: 1,5 m Ancho: 1,5 m Profundidad: 1,3 m	Recuperable
Tubería de tanque de	Largo: 0,33 m	Funcional

almacenamiento 2 a 3		Diámetro: 8 pulgadas	
Tanque almacenamiento 3	de	Largo: 2,37 m Ancho: 2,37 m Profundidad: 1,85 m	Funcional
Tubería de salida del tanque almacenamiento 3	de	Largo: 0,33 m Diámetro: 8 pulgadas	Funcional

Nota. Fuente: autores

Del anterior diagnóstico se realizó una ponderación de las partes del biodigestor a partir del estado actual del sistema de biodigestión, el cual se encuentra en un 38% funcional, teniendo en cuenta que hace 5 años no se le hace ningún tipo de mantenimiento ni ajuste. El 31% de los componentes son recuperables, con lo que sería un 69 % del sistema presenta buenas condiciones para su funcionamiento, sin muchas modificaciones y/o mano de obra. El 31% que presenta un funcionamiento desconocido determinará la viabilidad del diseño actual y posible puesta en marcha del biodigestor, teniendo en cuenta que las partes desconocidas como fosa y reactor (biodigestor), son parte principal del sistema biológico de transformación de la biomasa.



Gráfica 2: Estado ponderado del sistema de biodigestión, Fuente: autores.

5.1.3. Monitoreo de excretas:

Los resultados de la caracterización del sustrato (excretas porcinas) correspondientes a Sólidos totales (ST) pueden observarse en la Tabla 4. En esta se determina el promedio de Sólidos Totales, el cual fue de 43,5%, valor que se encuentra dentro de los valores recomendados por la FAO (40 – 60% de %ST), lo que garantiza un buen funcionamiento en los biodigestores discontinuos (Vamero, 2011), pero al porcentaje estar cerca al límite inferior indica que los microorganismos se van a ver limitados en degradar la materia orgánica. Las muestras presentan una desviación estándar del 6%.

Tabla 4: Análisis de excretas para producción de ST.

Muestra	Capsula vacía (g)	Cápsula muestra (g)	+ Cápsula muestra a 105 °C (g)	+ ST (%)
Excretas 1	91,97	141,87	118,17	53,30
Excretas 2	89,39	139,10	107,17	35,70
Excretas 3	89,60	139,76	109,10	38,87
Excretas 4	84,15	134,40	107,30	46,00
Promedio				43,50
Desviación estándar				6,20

Fuente: Autores

El análisis de los Sólidos Volátiles de las muestras de excretas se presenta en la Tabla 4, donde se aprecia un promedio para este parámetro del 82,26% de SV, lo que indica una gran disponibilidad de biomasa biodegradable y de ser potencialmente convertida en una fuente de energía alternativa, al tener un posible valor potencial de biogás cercano de los 0,323 m³/ kg SV para excretas porcinas (Olaya, 2009).

Se realizó una mezcla de excretas y agua de acuerdo a los resultados preliminares obtenidos por Cubillos, 2018, con las excretas producidas en esta misma institución. El pH y conductividad de la muestra resultante se analizó. Respecto al pH se midieron 8,45 unidades de pH, un valor fuera del valor óptimo para un biodigestor, el cual oscila entre 7 a 7,2 unidades de pH, no obstante, encontrándose cerca del rango recomendable de 6 a 8 unidades de pH; pH mayores a 7,6 retardan la amonización afectando la fermentación en el sistema (Olaya, 2009). En cuanto a la conductividad dio como resultado una medición 1435 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cumpliendo los parámetros de vertimiento en agua residual, pero cerca del límite establecido en 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual es importante tener en cuenta debido a que se el control de estos vertimientos por parte de la I.E.A. de Guacavía no es el adecuado.

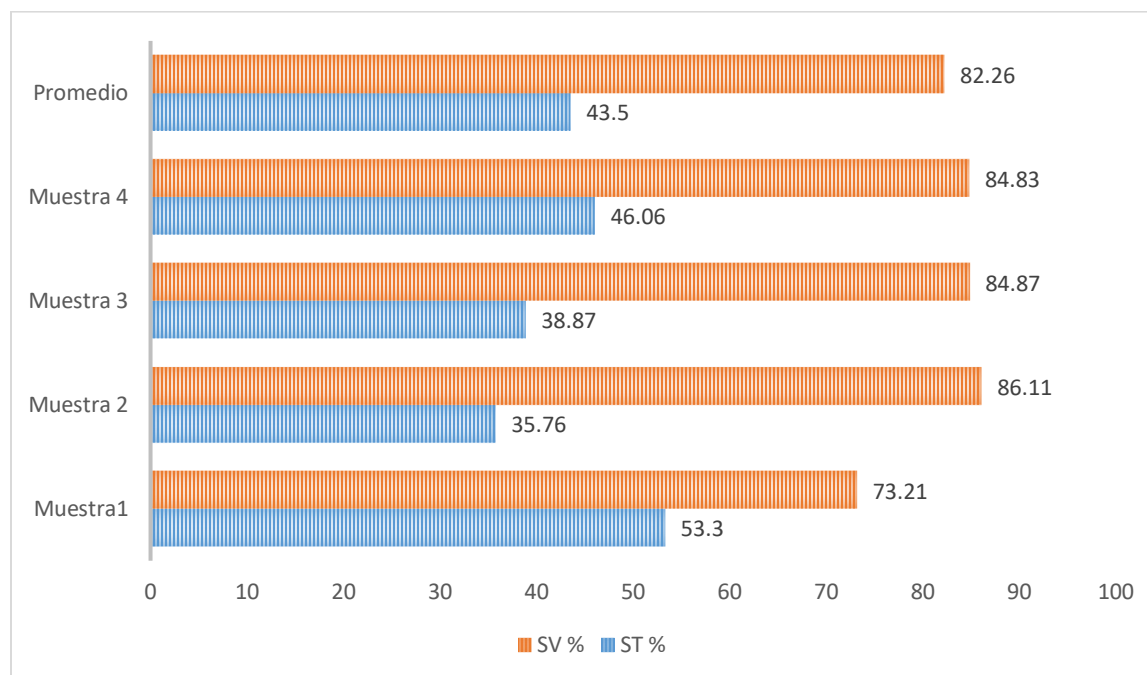
Tabla 5: *Análisis de excretas para producción de SV.*

Muestra	Crisol (g)	vacío	Crisol muestra seca a 105°C (g)	+ Crisol muestra a 505 °C (g)	+ SV (%)
Excretas 1	17,00		22,6	18,50	73,21
Excretas 2	21,84		27,4	22,61	86,11
Excretas 3	18,27		22,8	18,95	84,87
Excretas 4	19,05		21,84	19,47	84,83
Promedio				19,88	82,26
Desviación estándar				1,44	4,69

Nota. Fuente: Autores

En la Gráfica 3 se pueden observar los valores de ST y SV por muestra, teniendo en cuenta que la desviación estándar correspondiente para cada análisis fueron 6,2% y 4,69%, deberían realizarse nuevas caracterizaciones para poder conseguir datos más confiables, es decir una desviación estándar más baja, esto también lo recomienda (Sánchez & Pérez, 2019) en las

caracterizaciones de excretas realizadas en otros sistemas de biodigestión en la región del Meta, donde se explica que al desviarse la medición un 10% en total o más, los datos no son confiables. La desviación estándar total de la caracterización de la I.E.A. de Guacavía es del 10,90%.



Gráfica 3: Producción de ST y SV, fuente autores.

5.2.Segunda fase: Diseño de medidas para la recuperación del biodigestor de la Institución.

5.2.1. Reconocimiento de las fallas el biodigestor

Esta inspección se inició con conocimiento de que la zona y estructura total del biodigestor se encontraba en estado de abandono como nos indicaban antecedentes, abandono que llevaba un tiempo de 5 años aproximadamente (Cubillos & Huertas, 2019)

Partiendo del diagnóstico se da inicio al diseño de medidas para la recuperación del biodigestor tubular de la I.E.A. de Guacavía, el cual se dividió en los siguientes componentes para que fueran más específicos: Zona y estructura de cobertura del biodigestor, cámara de

recolección 1, cara de recolección 2, tanque de almacenamiento 1, Fosa, Reactor, tanque de almacenamiento 2, tanque de almacenamiento 3 y tuberías.

En el reconocimiento de la zona de estudio se hicieron observaciones muy detalladas sobre las estructuras que actualmente hay en el biodigestor para encontrar fallas y partes con deterioros para plantear los respectivos modos de recuperación de los mismos, entre este diagnóstico se realizó un levantamiento topográfico para así determinar con mayor certeza errores en cuanto a la pendiente ya que este es un estudio técnico y descriptivo de un terreno, donde se examina la superficie terrestre en la cual se tienen en cuenta las características físicas, geográficas y geológicas del terreno, también sus variaciones y alteraciones, los datos se reflejan en un plano que refleja al detalle y sirve como instrumento de planificación para edificaciones, reconstrucciones y construcciones (IGAC, 2018).

Teniendo los resultados de las medidas y el levantamiento topográfico se elaboró un plano del biodigestor con el programa AutoCAD versión 2018 donde se establece cuáles son las pendientes mínimas y cuáles son los diámetros de las estructuras del biodigestor.

Tabla 6: Medidas de levantamiento topográfico del biodigestor.

Punto	Nivel	Descripción
COTA	1,062 m	Terminado de concreto en el tanque de almacenamiento 1
1	1,684 m	Tubo de salida de tanque de almacenamiento 1 al reactor
2	1, 449 m	Tubo de llegada al tanque de almacenamiento 1 de la cámara 1
3	1,479 m	Tubo de llegada al tanque de almacenamiento 1 de la cámara 2
4	2,261 m	Profundidad del tanque de almacenamiento 1
5	1,199 m	Terminado de concreto en el tanque de almacenamiento 2
6	1,761 m	Tubo de llegada del reactor al tanque de almacenamiento 2
7	2,361 m	Profundidad del tanque de almacenamiento 2
8	1,252 m	Tubo de salida del tanque de almacenamiento 2 a la cámara de descarga

Cumal, estos parámetros garantizan las condiciones adecuadas para que el proceso anaerobio se cumpla correctamente; los parámetros que se utilizaron según las condiciones presentadas fueron, un tiempo de retención hidráulico de 20 días, una fase líquida del 70% correspondiente a 5,41 m³, una fase sólida del 30% 2,20m³ y una relación de agua/excretas correspondientes a 1:7, con los datos posteriores se calculó el número de cerdos necesarios para garantizar el caudal de excretas adecuado para alimentar el sistema de biodigestión el cual garantice el funcionamiento del reactor y aprovechamiento del sistema (Olaya, 2009).

Tabla 7: Parámetros de diseño para el biodigestor tubular.

Datos	Valor	Unidad
Longitud del reactor	9	m
Latitud del reactor	1,6	m
Perímetro	3,2	m
Radio	0,509	m
Diámetro	1,018	m ³
Volumen del reactor	7,35	m ³
Fase líquida	5,41	m ³
Fase de volumen	2,20	m ³
Alimentación total	0,257	m ³
Caudal de excretas	257	L/día
Relación ex/agua (1:7)	224,87	kg/día
kg de excretas	32,12	kg

Nota. Fuente: Autores

Según la tabla anterior, el volumen del reactor, el cual es la suma de la fase líquida y la fase sólida es de 7,35 m³, este volumen en función del tiempo de retención hidráulico (20 días), para que el sistema funcione adecuadamente deberá alimentarse con un caudal de excretas de 257 L/ día, debido a la relación tomada de aguas excretas de 1:7, deberá tener una proporción de 32,12 kg de excretas diarias que alimenten el sistema y una cantidad de agua de 224,87L/día,

por lo tanto, a la institución, debería programar un plan de cría para definir el promedio de cerdos que habitaran en la porqueriza y a partir de esto utilizar un reactor que se ajuste a sus necesidades para que el alimento del biodigestor no sea diluido y pueda el biodigestor funcionar de forma correcta en cuanto al tratamiento del agua residual, calidad de abono y fermentación necesaria para la producción de biogás (Olaya, 2009).

- **Zona y estructura de cobertura:** La zona fue limpiada de basura y de la cobertura vegetal muerta para que esta no ingresara al sistema del biodigestor y a su vez disminuir la proliferación de vectores en el lugar.
- **Cámara de recolección 1:** Para conocer el estado internode la cámarase desocupó (con baldes y palas) y se tuvo como resultado que esta cámara tenía fisuras en gran parte de sus ladrillos y terminados de concreto lo que posiblemente sea una de las causas o la causa de que agua residual y excretas se filtren y dispersen en la zona del biodigestor. También se observó que la cámara estaba llena en su totalidad y con desbordes debido a que las tuberías del biodigestor, específicamente la que lo conecta con el tanque de almacenamiento 1 estaban obstruidas, en conjunto con que las lluvias aportaban al nivel del agua debido a que la cámara no tenía su tapa de concreto. Esta cámara cuenta con otra tubería, la cual libera las excretas al ambiente cuando hay exceso en la cámara, pero no se pudo comprobar el estado de esta, pero por las filtraciones en el suelo, se puede deducir que también se encuentra obstruida. Para la puesta en marcha del biodigestor se necesita un revestimiento de concreto en el lugar de las fisuras y cambiar o poner ladrillos en el lugar donde sea pertinente en la estructura.



Figura 13: Estado de la cámara de recolección 1. Fuente: autores.

- **Cámara de recolección 2:** Se llevó a cabo la misma metodología que en la cámara de recolección 1 donde se observaron los mismos problemas tanto estructurales como funcionales. Al igual se encontró con otra tubería que libera las excretas a la zona para evitar que se desborden. Por ende se necesitan corregir las mismas características, las fisuras con un revestimiento de concreto y cambiar los ladrillos que sean pertinentes.
- **Tanque de almacenamiento 1:** En este tanque se retiró el agua estancada (con motobomba y baldes) para desocupar esta parte del biodigestor. Como resultado de esto se concluyó las excretas que se encontraban allí estaban en parte estancadas, debido a que las tuberías de alimentación estaban obstruidas por lo que desde hace algún tiempo no llegaban nuevas excretas, e nivel de esta aumentaba debido a las aguas lluvias, pero no se desbordaba debido a que la tubería de ingreso al reactor que conecta con este tanque funciona correctamente y permite el flujo tanto del tanque al reactor y viceversa. Este también presentaba fisuras y daños en su revestimiento de concreto. Para lo que se necesita que se arreglen estas fisuras con un revestimiento de concreto.
- **Fosa:** Con la misma metodología del tanque 1 se dio inicio el secado de la fosa para poder retirar el plástico, en el momento de estar liberando la fosa del agua, se observaba que el nivel del agua disminuía con dificultad y no alcanzaba a llegar al nivel de agua óptimo para retirar el plástico. A partir de esto se observó detalladamente la fosa cuando estaba en su mayoría seca y se encontró en diversos lugares de la fosa como se filtraba agua del nivel freático del terreno. Este problema se ve agravando en la temporada actual (época de lluvias) en el departamento del Meta. Para esta problemática se plantea la construcción de un drenaje que permita evacuar estas filtraciones. Se plantean las siguientes alternativas:

Subdrenes filtro espina de pescado:

Consisten en poner debajo de la fosa una serie de drenes paralelos a 45° que conducen a un dren central, de esta forma selogra un mayor cubrimiento del área. La tubería va perforada con pequeños orificios (Figura 14), el área total de orificios tiene que ser superior a $100 \text{ cm}^2 / \text{m}$ de tubo, eso corresponde a orificios con un diámetro de 1 cm y una distancia entre ellos de 2,5 cm o $> 12,7$ orificios por metro lineal; se colocan dentro una capa de piedra bola o grava (Chacón, 2015), en este caso se plantea poner sobre el filtro una lámina de arena de 15 cm de grosor y sobre esta una capa de gravilla de 25 cm de ancho. Estos tubos deben ser colocados al fondo de la capa, para permitir que todas las aguas se percolen al interior del tubo. Es importante que exista una capa de filtro de geotextil para evitar que se colmaten los tubos.

Para lograr tal vaciamiento es recomendable dar al fondo una inclinación de 1 a 2%, de este modo el agua se filtrara y se vaciara por medio de la tubería (Chacón, 2015). Es importante eliminar toda vegetación a los alrededores de la fosa del biodigestor, principalmente las grandes plantas, tratando de desarraigarlos para evitar problemas de filtración.

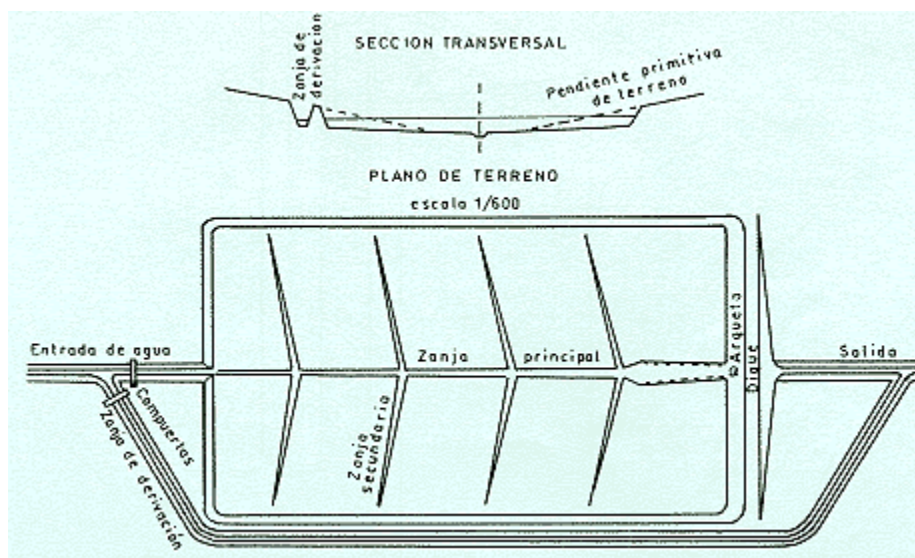


Figura 14: Figura de la tubería espina de pescado. Fuente: Voto, 1999.

En la fase de diagnóstico y adecuación de las estructuras se evidenció que el desbordamiento de agua no era producto de diseño hidráulico y taponamiento de las

tuberías, esto se debe al alto nivel freático que presenta esta zona y mucho más en las épocas de lluvia, debido a esta infiltración en la fosa del biodigestor se perjudica en gran parte el proceso anaerobio debido a que baja la temperatura del reactor.

Efecto de la temperatura influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico, la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura y el daño que pueda causar a los microorganismos presentes en el medio después de ciertos valores de ésta. Hay dos rangos de trabajo donde puede efectuarse satisfactoriamente la anaerobiosis de aguas residuales los cuales son mesófilico entre 20 y 45 °C y termófilico entre 45 y 60 °C (Yaniris & Obaya, 2015)

La temperatura adecuada en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de residual que se maneje y de las condiciones ambientales. Por lo tanto, se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55 °C para los tratamientos mesófilos y termófilos, respectivamente (Yaniris & Obaya, 2015).

Cuando se trabaja a temperaturas bajas se puede producir serias afectaciones en la producción de biogás, ya que en estas condiciones de operación en ocasiones tienen lugar a bastante fluctuaciones en este parámetro lo que afecta el estado fisiológico de los microorganismos presentes en el proceso de biodigestión (Medina Portillo, 2016). Esto se hace mínimo en climas tropicales y subtropicales para gran parte del año, lo cual ha sido comprobado en los estudios realizados con residuales porcinos y en anaerobiosis de residuales de destilería, donde se obtuvo un 9 % más de eficiencia al operar en rango termófilo y con buena estabilidad del proceso (Yaniris & Obaya, 2006).

Por esta razón se planteó la actividad de la implementación del sistema de drenaje por medio del método “espina de pescado” ya que es un modo eficiente para la evacuación del agua, este método tiene dos tipos de drenaje superficial y subterráneo. El drenaje superficial es una obra que viene como consecuencia de la incapacidad del exceso de agua en la superficie de trasladarse hasta un punto de desfogue. En cuanto al drenaje subterráneo, se produce por la incapacidad de evacuar el exceso de agua presente en el perfil del suelo hasta una salida subterránea satisfactoria (García, 2018). Este

sistema es el más popular el cual se propone implementar para la adecuación del reactor por su bajo costo y eficiencia. En cuanto al resto de las estructuras del biodigestor de la Institución en el diagnostico se pudo observar que las adecuaciones son más superficiales como limpiezas de implementos y un revestimiento con concreto a las cámaras de recolección en las fisuras que se encuentran para evitar el escape del residual.

- **Reactor:** El reactor no se pudo retirar debido a los problemas de manto freático de la fosa, si la bolsa no presenta fugas se debe retirar y lavar para que su funcionamiento desde no sea alterado y mejore su aspecto visual e implementar la tubería de salida del biogás para que este pueda ser aprovechado, este tubo puede ser instalado haciendo un hueco en el plástico de ½ pulgada (Gómez, 2012) donde con:

- Dos arandelas metálicas
- Un adaptador macho y hembra de PVC
- Dos trozos de hule de 5cm²

Con estos elementos se hace un montaje (Figura 15) donde al adaptador hembra se une a la tubería de ½ pulgada y luego dentro de la bolsa se introduzca el adaptador macho, una arandela y un trozo de hule desde el exterior de la bolsa se coloque el otro hule y la arandela, apretando bien por los adaptadores y sellando por fuera con silicón rojo para evitar fugas, el silicón solo se aplica por fuera ya que por dentro influye en las reacciones del biodigestor, especialmente en la fermentación que se produzca.

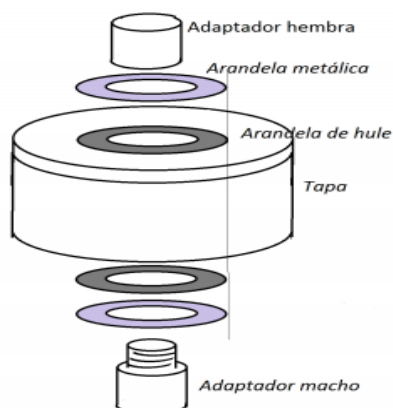


Figura 15: Válvula para recolección del biogás (Gómez, 2012).

Otra alternativa que puede suceder es que la bolsa tenga fugas y pueda ser reparada con parches de llantas que queden bien sellados, los cuales cumplirían una función similar al hule evitando fugas (Gómez, 2012).

- **Tanque de almacenamiento 2:** En este tanque se retiró el agua allí estancada de igual manera que en el tanque de almacenamiento 1. En este se observó que contaba con fisuras en los ladrillos y terminados de concreto, lo que permite que el nivel de agua de esta crezca por filtraciones del suelo y de la fosa de esta forma es que el nivel de agua se mantiene en el tanque de almacenamiento 3 y de igual manera al reactor debido a que la alimentación del sistema estaba obstruida, haciendo que la relación de agua/excretas se vea afectada, de igual manera es afectada por las lluvias ya que no se encontraba sellada con la tapa de concreto que cuenta la estructura. Este tanque por la pendiente en el sistema debe ser modificado ya que no cuenta con la pendiente necesaria, el tubo se encuentra 7 cm más alta que el tubo del tanque de almacenamiento(según el levantamiento topográfico) y disminuir la altura del tubo que llega del reactor 10 cm y revestir con concreto las zonas que presentan fisuras.



Figura 16: Tapa del tanque de almacenamiento 2.

Por lo anterior se plantea la siguiente actividad para darle una pendiente óptima al reactor, romper la estructura en la parte inferior del tubo de tal modo que el tubo pueda bajar hasta dar un nivel de 3° (10 cm) que es lo que se necesita para el líquido fluya de manera más eficiente, luego de esto se procede a pegar el tubo con concreto para que este quede fijo.

- **Tanque de almacenamiento 3:** Este tanque fue vaciado y se observaron problemas de fisuras en su estructura, por ende, se debe revestir con concreto el lugar donde presenta las fisuras.
- **Tuberías:** En cuanto a las tuberías parecen todas estar en buen estado, el único problema que tenían las de entrada al tanque 1, eran que estaban obstruidas con excretas, para lo que se destaparon a través de aplicar agua en la tubería y deshacer la obstrucción con una varilla metálica que alcanzaba a cubrir los casi 6,60 m de largo que tienen estas tuberías, como resultado las tuberías quedaron habilitas y funcionales para evitar el paso de excretas y que se vuelvan a tapar además que el reactor y la fosa se llenen de excretas,

estas se dejaron taponadas con lonas de fácil retiro. El biodigestor cuenta con 8 tuberías de diferentes pulgadas. Las tuberías encontradas en la cámara de recolección 1 y 2 son de 8 pulgadas que liberan los excesos al ambiente deben desenterradas para mirar el lugar donde finalizan y observar el estado de las mismo.

5.3. Potencial de biogás (a escala laboratorio) de las excretas porcinas de la I.E.A. de Guacavía.

5.3.1. Toma de muestras (excretas) y montaje experimental para determinación del potencial de biogás en los laboratorios de la Universidad Santo Tomas Villavicencio.

Eficiencia del montaje experimental de determinación de potencial de biogás



Figura 17: Montaje experimental realizado para la obtención de biogás. Realizado por: Ariza y Pinzón 2020

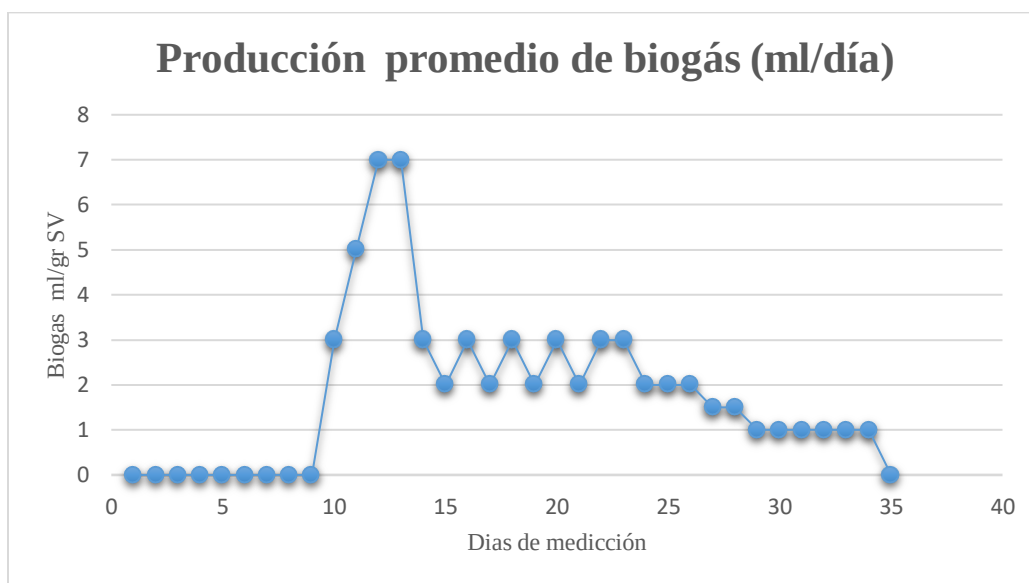
Teniendo los resultados de las mediciones de la producción diaria se elabora la siguiente tabla donde se registran los resultados de producción de biogás acumulativa y diaria.

Tabla 7: Lectura de producción de biogás

Días de medición	Medición diariaml/grSV	Medición acumulativa ml/grSV
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	3	3
11	5	8
12	7	15
13	7	22
14	3	25
15	2	27
16	3	30
17	2	32
18	3	35
19	2	37
20	3	40
21	2	42
22	3	45
23	3	48
24	2	50
25	2	52
26	2	54
27	1,5	55,5
28	1,5	57
29	1	58
30	1	59
31	1	60
32	1	61
33	1	62
34	1	63
35	0	63

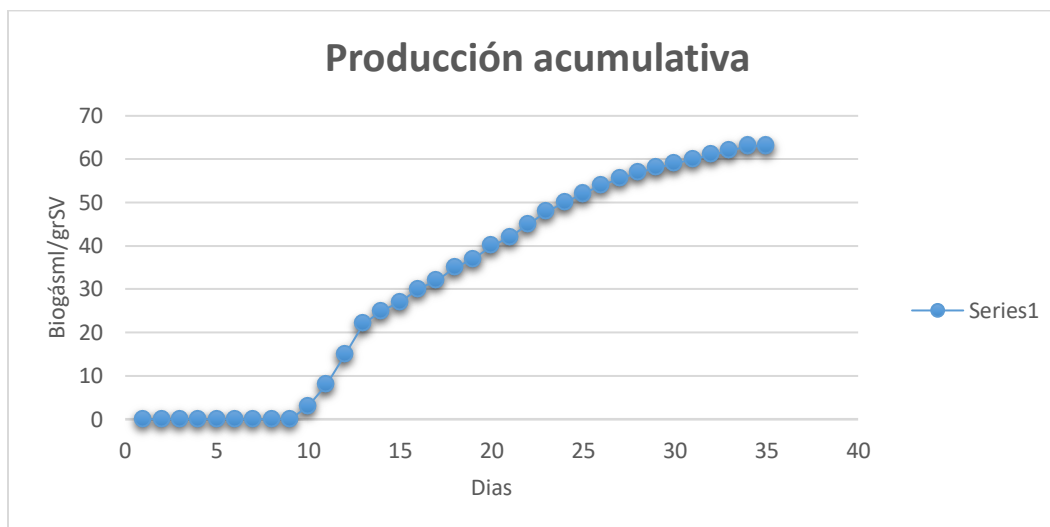
Nota: Fuente propia

Con los datos registrados se elaboran las respectivas gráficas, donde se evidencia que la producción de biogás en los primeros 9 días no se registran resultados posiblemente a que las bacterias se encontraban en estado de reposo, empieza la producción de biogás al día 9 de haberse realizado el montaje, se empieza a registrar su producción máxima en los días 10 a 14 debido a la descomposición de la fracción del sustrato más fácilmente degradable por lo que se presenta mayor producción de biogás, seguidamente se produce de modo constante hasta el día 26, a partir de allí empieza a disminuir hasta 0 de producción (ml/gr SV), hasta finalizar las mediciones el día 35. Es posible analizar cómo se va degradando la materia orgánica al final del proceso de digestión esto se debe a que el sistema se encuentra en periodo de estabilización, puesto que los microorganismos que aportan las excretas se van acoplando al medio a medida que avanzan los días de degradación de material orgánico (Grafica 4).



Gráfica 4: Comportamiento diario de la producción de biogás

La Gráfica 5 representa la producción diaria acumulativa la cual determina la curva de producción en la cual se observa el potencial de biogás logrado notándose un comportamiento favorable, que se encuentra representado por el valor acumulado final con 63 ml/día.



Gráfica 5: Producción acumulativa de biogás.

Para calcular finalmente el potencial de biogás de las excretas de cerdo y el inoculo utilizando del reactor de la Universidad Santo tomas, las relaciones 1:7 durante el tiempo experimental, se aplicó la siguiente ecuación dada por el manual alemán de ingeniería (Verein Deutscher Ingenieure, 2010), el cual se basa en una medición volumétrica estandarizada en la metodología (American Public Health Association, 1992).

Ecuación 5. Cálculo del potencial de biogás obtenido (V.D.I, 2010)

$$\text{Producción de biogás} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\%ST}{100} * \frac{\%SV}{100} * \text{Tasa de Biogás} \left(\frac{m^3}{Kg SV} \right) * \text{Excretas añadidas} \left(\frac{kg}{d} \right)$$

Donde:

%ST: Porcentaje de sólidos totales

%SV: Porcentaje de sólidos volátiles

Tasa de biogás: Volumen de biogás acumulado durante el tiempo de digestión.

Excretas añadidas: Masa de sustrato adicionada al reactor en términos de sólidos volátiles.

Resultado de la aplicación de la ecuación anteriormente nombrada, se obtuvo el siguiente dato en cuanto al potencial de biogás de las excretas de cerdo de la I.E.A. de Guacavía e inóculos utilizado.

Tabla 1: *Potencial de biogás obtenido de las excretas de cerdo*

Potencial de biogás obtenido ml/grSV
Montaje experimental 1:7
Excretas de Cerdo de la I.E.A. de Guacavía –Inóculo del reactor de la USTA
176,06

Nota: *Potencial de biogás que tienen las excretas de cerdo de la I-E-A de Guacavía- inóculo tomado de la USTA- Villavicencio. Fuente: autores*

El valor de biopotencial de las excretas de la I.E.A. de Guacavía se encuentra dentro del rango posible de producción de biogás para excretas porcinas, el cual se encuentra en alrededor de 200 ml/ g SV (Rojas et al., 2010).

5.3.2. Cálculo del Caudal de Mezcla (QTotal) óptimo entrando al biodigestor

Mediante las siguientes formulas dadas por (Vamero, 2011) se determinó el volumen del biodigestor y kg de excretas necesarios para la alimentación del biodigestor de la I.E.A. de Guacavía, suponiendo la mezcla óptima de excretas/agua de 1:7.

Tabla 9: *Formulas paracálculo del caudal de mezcla*

Determinación	Formula	Descripción
Determinación del perímetro	$A * A = P$ $\frac{P}{2 * \pi} = R$	A= Ancho P=Perímetro R= Radio $\pi=3.14$
Volumen del biodigestor	$V = \pi * R^2 * L$	V= Volumen del reactor $\pi= 3.14$ R= Radio L=Largo
Caudal de excretas		-Q Excretas= Kilogramos de excretas diarias alimentadas al tanque de prealimentación

$$Q_{Total} = Q_{Excretas} + Q_{Agua}$$

-Q Agua= Masa de agua obtenida a partir de la Relación de excreta/agua de 1:7
-Q Total= Caudal alimentado al tanque de alimentación

Nota: Fuente. (V.D.I, 2010)

Remplazamos por los valores obtenidos en la fase de diagnóstico (Tabla 4).

$$P = 1,6 \text{ m} * 1,6 \text{ m} = 3,2 \text{ m}$$

$$R = \frac{3,2}{2 * 3,14} = 0,51 \text{ m}$$

$$^2V = 0,314 * (0,51 \text{ m})^2 * (9 \text{ m}) = 7,35 \text{ m}^3$$

$$\text{Fase líquida } 70 \% = 7,35 \text{ m}^3 * 0,7 \text{ m} = 5,145 \text{ m}^3$$

$$\text{Fase gaseosa } 30 \% = 7,35 \text{ m}^3 * 0,3 = 2,205 \text{ m}^3$$

$$Q_{Total} = \frac{V_{\text{Fase líquida}}}{TRH} = \frac{5,145 \text{ m}^3}{20} = 0,257 \text{ m}^3$$

Para las dimensiones actuales del biodigestor, el caudal de mezcla para un tiempo promedio de TRH de 20 d (valor óptimo para el proceso anaerobio), debe ser de $0,257 \text{ m}^3$ (Q_{Total}). Para la mezcla que presenta una densidad de 1000 kg/m^3 , correspondería a un flujo másico de 257 kg/d . De esta mezcla de entrada 1 parte corresponden a excretas frescas y 7 partes a agua de lavado, por consiguiente

$$Q_{\text{Excretas}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = \left(\frac{257 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{8} \right) * 1 = 32,125 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \text{ de excretas frescas}$$

$$Q_{\text{Excretas}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = \left(\frac{257 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{8} \right) * 7 = 224,875 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \text{ de agua de lavado}$$

Determinación de producción de biogás diaria:

$$\text{Producción de biogás} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) = \frac{43,5 \%ST}{100} * \frac{82 \%SV}{100} * 0,176 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg SV}} \right) * 32,125 \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = 2,016 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

5.3.3. Cantidad de cerdos necesarios para la operación óptima del biodigestor

El número de cerdos necesarios para obtener los 32,125 kg de excretas frescas que necesita el biodigestor. Esto dependerá del tamaño de los cerdos presentes en la Granja. Según Olaya, 2009 para las condiciones en Colombia, un cerdo produce el 2% de su peso vivo en excretas diariamente: Producción excretas diarias (kg /d) = Número de Cerdos * PV * (2 % /100)

Si se asume para este cálculo que se tiene sólo cerdos jóvenes de 100 Kg de Peso Vivo (PV), se tendría:

$$\text{Producción de excretas diarias (Kg/d)} = \text{Número de cerdos} \\ \text{PV} * (2\% /100)$$

Para las dimensiones actuales, las cuales requieren 32,125 kg de excretas frescas se tiene:

$$\text{Número de cerdos} = \frac{32,125 \text{ Kg/d}}{100 \text{ Kg} * (2\%/100)} = 16,0625 \text{ cerdos}$$

6. Conclusiones

En una ponderación de las estructuras evaluadas y descritas, se determina que el 69 % de estas partes pertenecientes al sistema de biodigestión no necesitan o necesitan pocas modificaciones o mejoras, por ende, un rediseño del sistema es viable debido a que poco porcentaje de estas estructuras necesitan cambios significativos en cuanto a mano de obra y rubro económico.

La fosa del biodigestor es la parte que más afecta a la puesta en marcha del sistema de biodigestión debido a problemas que causan el nivel freático del terreno y la pendiente de que desfavorece a la fluidez y tiempo de retención del reactor.

La mejora y puesta en marcha del sistema de biodigestión se debe desarrollar en temporada seca, para que el secado de la fosa y el manejo del terreno y la implementación de infraestructura o tecnologías no tengan complicaciones por inundaciones o anegamiento del terreno. Esto debido a las inundaciones que se presentan en la fosa debido al nivel freático del terreno donde está ubicado el biodigestor, el cual es un problema muy frecuente que se presenta en los sistemas de biodigestión.

Debe hacerse una restructuración de las cámaras de recolección para modificar la tubería que libera excretas al terreno del biodigestor para cambiar el lugar de su disposición o clausurar esta tubería, debido a que estas aguas sin tratar pueden llegar a acuíferos propios y aledaños de la institución, además de afectar el nivel freático de la zona.

El análisis del sustrato de las excretas demostró que el porcentaje promedio de Sólidos Totales (ST) es del 43,05% y en cuanto a Sólidos Volátiles (VS) es de 82,26%, demostrando que la materia orgánica disponible está en gran cantidad, pero los microorganismos se van a ver limitados en degradarla.

El número de cerdos actual (16) en la porqueriza es suficiente para poner en marcha el biodigestor, con la cantidad de excretas que los cerdos están aportando actualmente la mezcla será un poco diluida y no ocupara totalmente el volumen del biodigestor ($7,35\text{m}^3$), que este diluida la mezcla y el vacío por el déficit de caudal de excretas en el tanque afectara la fermentación de las excretas y por lo tanto la calidad de los productos y subproductos que se

generen en el sistema, para el correcto funcionamiento se necesitaría un promedio de 16,06 cerdos en la porqueriza, estos 16,06 cerdos producirán de $2,01 \frac{m^3}{d}$ de biogás.

Con las unidades de pH presentes en la mezcla de excretas realizadas (8,45 unidades de pH), se concluyó que la fermentación en el proceso anaerobio se puede ver afectada debido a la orina, si la mezcla de agua es 1:7 se diluirá más la orina y no se afectaría tanto el pH, ya que el agua tiene un pH de 7.

El vertimiento de agua residual es un problema destacado en el sistema debido al abandono del sistema y la inadecuada disposición final de estas, la normativa dicta que en cuanto a conductividad de vertimiento de aguas residuales porcinas es de $1500 \mu S/cm$ y la medición en la mezcla es de $1435 \mu S/cm$, lo cual está dentro de la normativa, no obstante, el no vigilar constantemente el cumplimiento del parámetro y al no tratarlas correctamente puede sobre pasar el límite en cualquier momento.

El nivel freático es un factor de gran importancia que se debe tener en cuenta al momento de plantear un proyecto de construcción de un biodigestor, ya que este no permite que las bacterias ejecuten su trabajo de manera óptima lo que provoca problemas en el proceso de producción de biogás, por lo tanto, hay retrasos de la producción, al tenerse en cuenta este factor ya después ejecutar el proyecto ocasiona gran aumento en los costos tratando de prevenir inundaciones por el nivel freático.

La mejora y puesta en marcha del sistema de biodigestión se debe hacer en temporada secas, para que el secado de la fosa y el manejo del terreno para la implementación de infraestructura o tecnologías no tengan complicaciones por inundaciones en la fosa o anegamiento del terreno.

Debe hacerse una restructuración de las cámaras de recolección para modificar la tubería que libera excretas al terreno del biodigestor para cambiar el lugar de su disposición o clausurar esta tubería.

En el rediseño del biodigestor se debe instalar la estructura necesaria para el aprovechamiento del biogás, debido que al tener una producción de biogás estimada de 176,06

ml/ gr SV, se genera una cantidad de gas aprovechable para beneficio energético y/o económico para la institución.

7. Recomendaciones

Al momento de instalar el polietileno para impedir que existan fugas de agua es indispensable que se realicen suficientes refuerzos de amarres del plástico a la tubería de entrada y salida de los tanques de almacenamiento con tiras de neumático, hasta que no se evidencie algún escape de agua, es importante poner en consideración el cambio del polietileno ya que visualmente puede que no tenga fisuras pero debido al tiempo que lleva allí inundado (Anexo 2), su tiempo de vida útil restante debe ser poco, por lo tanto se recomienda el cambio para evitar inconvenientes tiempo después de que el biodigestor esté en funcionamiento.

Debido al resultado obtenido en la caracterización de excretas se determina que la cantidad de cerdos actuales en la porqueriza, no suministran la cantidad de excretas necesarias para la alimentación del reactor, por lo tanto es de gran importancia considerar, las excretas residuales de la granjas porcinas vecinas del sector, ya que la faltante es poca, se puede hacer recolección de este material residual e alimentar el biodigestor de la institución cuando este se encuentre en operación óptima después de implementar los ajustes sugeridos en el presente proyecto.

Crear una proyección de la crianza de cerdos en la institución educativa para manejar un estimado de las excretas disponibles para alimentar el biodigestor y de esta forma mantener un promedio de cerdos que lo permitan.

Cuando el biodigestor se encuentre en operación es recomendable una óptima relación excreta - agua, ya que la variación del agua en la mezcla alimentada afecta el porcentaje de remoción del biodigestor, esta cantidad de agua viene definida por el agua de lavado de las porquerizas. Por consiguiente es deseable mantener esta relación de excretas- agua constante, a través de un lavado regular con volúmenes que permitan estar dentro de la relación óptima de 1:7..

Referencias bibliográficas

- Alberto, C., Severiche-Sierra Jr, C. A., Bertel, M., Leonor, R. & Acevedo-Barrios, R. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas*. Santa Marta: INVEMAR
- American Public Health Association. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S. A.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=307542>
- Beltrán, J. A. Z., Nieves, J. E. B. & Sanabria, D. F. C. (2015). *Biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos*. 25. Tesis de Grado. Universidad Minuto de Dios.
- Cervantes, F. J., & Saldívar-Cabral, J. (2007). Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1), 10-12.
- Chacón, V. (2015). *Memoria técnica diseño de drenes y canal Perimetral*. Diseño del sistema de drenaje del reservorio de plataforma alta.
http://www.edec.gob.ec/sites/default/files/memoria%20tecnica%20dise%C3%B1o%20de%20drenes%20y%20canal%20Perimetral.3_0.pdf
- Cubillos, D., & Huertas, D. (2019). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la institución educativa agrícola Guacavía, Cumaral-Meta*. Tesis de Grado. Universidad Santo Tomás Villavicencio.
- Cubillos, R. (2018). *Año de récord para el sector porcino colombiano*. Comunidad Profesional Porcina.
https://www.3tres3.com/articulos/2018-ano-de-record-para-el-sector-porcino-colombiano_40881/
- Landín, Gerardo M. (2006). *Producción de excretas porcinas y contaminación ambiental*. Universo porcino.
http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/manejo_porcino_03-2013_produccion_de_excretas_porcinas_y_contaminacion_ambiental.html
- Garzón-Zúñiga, M. A., & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 65–79.
- Gómez, S. (2012). *Diseño Construcción y puesta a punto de Un biodigestor tubular Carazo 7 Nicaragua*. Tesis de Grado. Madrid: Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III .
<https://core.ac.uk/download/pdf/30046846.pdf>

- Gonzalo. (2011, noviembre 4). *PROY GONZALO* [Informativa]. Unilibre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/>
- IGAC. (2018). *¿En qué consiste un levantamiento topográfico?* <https://www.igac.gov.co/es/contenido/en-que-consiste-un-levantamiento-topografico>
- Marín, O. A. L., & Hernández, J. C. M. (2019). *Diseño de un sistema de alerta temprana por inundaciones en la Institución Agrícola de Guacavía en Cumaral-Meta*. Tesis de Grado. Universidad Santo Tomás Villavicencio.
- Olaya, Y. (2009). *Fundamentos Para el Diseño de Biodigestores*. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
- Porkcolombia. (2019). *Aumenta la producción porcina en Colombia*. https://www.3tres3.com/ultima-hora/aumenta-la-produccion-porcina-en-colombia_42062/
- Rojas, C., Contreras, H., Mosquera, N., & Rodríguez, M. (2018, julio). *Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestión anaerobia con excretas animales*. Documento de Trabajo. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle>
- Vamero, T. (2011). *Manual de Biogás*. <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Yaniris, L., & Obaya, C. (2006). *La Digestión Anaerobia y los reactores UASB, Generalidades*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>
- Yaniris, L., & Obaya, C. (2015). *La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte 1*. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

Anexos



Anexo 1: Reactor tipo Fed – Batch de donde fueron tomados los inóculos, ubicado en el laboratorio de conversión de energías de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio. Fuente: autores



Anexo 2: Estado del polietileno del reactor. Fuente: autores.



Anexo 3: Limpieza en los alrededores del biodigestor, para facilitar la fase 1(diagnostico)
Fuente: autores.



Anexo 4: Destaponamiento de las tuberías de la cámara de recolección 1 al tanque de almacenamiento 1 con agua y un tubo. Fuente: autores.



*Anexo 5: Destaponamiento de la tubería de la cámara de recolección 2 hacia el tanque de recolección 1.
Fuente: autores*