



UNIVERSIDAD DE
CUNDINAMARCA
Generación Siglo 21

**Prototipo de biodigestor a escala de laboratorio para la
producción de energía alternativa y comparación de calidad
de efluentes de sistemas de biodigestión en la zona rural de
Fusagasugá.**

Yury Andrea Chipatecua Zárate

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Programa: Zootecnia
Fusagasugá, Cundinamarca
2023



Prototipo de biodigestor a escala de laboratorio para la producción de energía alternativa y comparación de calidad de efluentes de sistemas de biodigestión en la zona rural de Fusagasugá.

Yury Andrea Chipatecua Zarate

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Zootecnista

Director:

MSc, Jairo Enrique Granados Moreno, PhD(c)
L. Química

Andrés Mogollón Reina

Codirector

Universidad de Cundinamarca
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Programa: Zootecnia
Fusagasugá, Cundinamarca

2023

(Dedicatoria o lema)

Este logro lo dedico en primer lugar a DIOS, quien ha sido mi inspiración todo este tiempo y quien ha sido mi impulso para sacar adelante mi carrera durante todos estos años, con perseverancia, motivación y esfuerzo; también le agradezco a mi madre y hermana por brindarme su apoyo todo el tiempo que lo necesite.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la Universidad de Cundinamarca, Facultad de ciencias agropecuarias, programa de Zootecnia por creer en la elaboración de este proyecto. Al profesor Jairo Enrique Granados Moreno, quien me acompañó y guió durante todo el proceso, al docente Andrés Mogollón Reina y Diego Andrés Abril, por todo el apoyo y constancia, a los jurados de trabajo de grado David Esteban Contreras y Guillermo Caicedo por su tiempo y conocimiento para mejorar este trabajo y dar unos buenos resultados. Al personal de laboratorio que hizo parte de cada uno de los procesos experimentales de esta investigación, a cada uno de mis compañeros de laboratorio, en especial a mi gran amiga Lizeth Beltrán Vargas, a Stephanie Hernández y Miguel Ángel Porras. Agradezco enormemente a cada uno de los productores que permiten a diario visitar cada una de sus producciones pecuarias, a mi familia y a mis mascotas que son parte fundamental de esta etapa.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la producción de un prototipo biodigestor a escala laboratorio para la producción de energía alternativa y la comparación de la calidad de los efluentes producto del biodigestor a partir de una mezcla de agua, excretas porcinas e inóculo bacteriano. El material orgánico utilizado para el proceso de fermentación anaerobia se obtuvo del predio Buenos Aires ubicado en zona rural de Fusagasugá y la investigación se desarrolló en el laboratorio de Nutrición y Bioquímica de la Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Se planteó un diseño experimental completamente al azar (DCA), donde el factor independiente correspondió al tipo y cantidad de efluente con el cual se alimentó el biodigestor y el análisis de cada variable se realizó por triplicado. Se diseñaron 3 tratamientos: PLT1 (600g de excreta porcina y 2400 ml de agua destilada) PLT2 (200g de excreta porcina, 100g de inóculo microbiano y 700 mL de agua destilada) y PLT3 (200g de excreta porcina 200g de inóculo bacteriano y 600 mL de agua destilada). Se analizaron las diferentes variables fisicoquímicas en afluentes, efluentes y biogás concluyendo que las excretas porcinas presentaron variabilidad en los datos pero obtuvieron una confiabilidad alta, determinando que las variables analizadas presentaron rangos similares a los reportados en literatura, por otra parte el efluente producto del biodigestor en PLT1 y PLT2, tuvo más credibilidad en los análisis de cada una de las variables fisicoquímicas, principalmente de pH, el cual brindó solidez con respecto al análisis de los diferentes minerales, sales y nutrientes de los efluentes obtenidos. Por consiguiente, la producción de biogás obtuvo un volumen evidentemente mas alto en PLT3 como consecuencia de la adición de inóculo bacteriano, que, al combinar los diferentes grupos de microorganismos, aumentó el volumen de los productos de biodigestión, permitiendo la degradación de los compuestos orgánicos y maximizando la producción del biocombustible.

Palabras clave: Biodigestor, excreta, inóculo, efluente, biogás, variables.

ABSTRACT

The present research aimed to evaluate the production of a prototype biodigester at laboratory scale for the production of alternative energy and the comparison of the quality of the effluent's product of the biodigester from a mixture of water, porcine excreta and bacterial inoculum. The organic material used for the anaerobic fermentation process was obtained from the Buenos Aires property located in rural Fusagasugá and the research was developed in the Nutrition and Biochemistry laboratory of the Faculty of Agricultural Sciences, University of Cundinamarca, Fusagasugá headquarters. A completely randomized experimental design (DCA) was proposed, where the independent factor corresponded to the type and amount of effluent with which the biodigester was fed and the analysis of each variable was carried out in triplicate. 3 treatments were designed: PLT1 (600g of porcine excreta and 2400 ml of distilled water) PLT2 (200g of porcine excreta, 100g of microbial inoculum and 700 mL of distilled water) and PLT3 (200g of porcine excreta, 200g of bacterial inoculum and 600 mL of distilled water). The different physicochemical variables in tributaries, effluents and biogas were analyzed, concluding that the porcine excreta presented variability in the data but obtained a high reliability, determining that the analyzed variables presented ranges similar to those reported in the literature, on the other hand the effluent product of the biodigester in PLT1 and PLT2, had more credibility in the analysis of each of the physicochemical variables, mainly of pH, which provided solidity with respect to the analysis of the different minerals, salts and nutrients of the effluents obtained. Consequently, the production of biogas obtained a significantly higher volume in PLT3 as a result of the addition of bacterial inoculum, which by combining the different groups of microorganisms, increased the volume of biodigestion products allowing the degradation of organic compounds and maximizing the production of biofuel.

Key words: Biodigester, excreta, inoculum, effluent, biogas, variables.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	JUSTIFICACIÓN	16
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
4.	OBJETIVOS	19
4.1	Objetivo general:	19
4.2	Objetivos específicos:	19
5.	REVISIÓN DE LITERATURA	20
5.1	Marco conceptual	20
5.2	Biodigestión anaeróbica:	20
5.3	Etapas de la digestión:	22
5.3.1	<i>Bacterias acidogénicas:</i>	22
5.3.2	<i>Bacterias acetogénicas:</i>	22
5.3.3	<i>Bacterias metanogénicas:</i>	22
5.3.4	<i>Bacterias hidrogenotróficas:</i>	22
5.4	Biodigestor	23
5.5	Modelos de biodigestores	24
5.6	Biorreactores:	26
5.7	Biogás:	27
5.8	Ley de los gases ideales:	29
6.	MARCO REFERENCIAL	30
7.	MATERIALES Y MÉTODOS	36
7.1	Localización del experimento:	36
7.2	Muestras experimentales:	36
7.3	Tratamientos o muestras utilizadas.	37

7.4 Variables evaluadas:.....	40
7.5 Diseño experimental:.....	41
7.6 Análisis estadístico:.....	42
7.7 Procedimientos:.....	42
7.7.2 Montaje del prototipo de biodigestor:	44
7.7.5 Montaje para producción de biogás:	47
7.7.6 Muestras en Erlen Meyer, completadas a volumen:	48
7.7.7 Agitación de las Muestras:	48
7.7.9 Toma de muestras de biol:.....	49
7.7.10 Control de variables externas:	49
7.7.11 Control de variables internas:.....	50
7.7.12 Medición de concentración de gases:	50
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
8.1 Análisis fisicoquímico de excretas porcinas	51
8.2 Variables evaluadas en el biogás:.....	55
8.2.1 comportamiento de la presión ejercida por el biogás:.....	55
8.2.2 Comportamiento del volumen de biogás producido.....	56
8.2.3 comportamiento de la producción acumulada de biogás para cada uno de los tratamientos.	60
8.2.4 Composición fisicoquímica de las variables presentes en los bioles obtenidos de cada uno de los prototipos de biodigestores.....	64
9. CONCLUSIONES	70
10. RECOMENDACIONES.....	72
11. ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
12. BIBLIOGRAFIA	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.	23
Figura 2. Biodigestor a escala de laboratorio con matraces.	26
Figura 3. Biorreactores del Laboratorio de Bioprocesos del Centro de investigación en biotecnología.....	27
Figura 4. Composición del biogás en porcentajes	28
Figura 5. Laboratorio de nutrición y bioquímica de la facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de Cundinamarca.....	36
Figura 6. Ubicación Finca Buenos Aires, Vereda Sardinas.....	37
Figura 7. Sujetos experimentales para la recolección de excretas porcinas frescas.	37
Figura 8. Tratamientos utilizados para la evaluación del prototipo de biodigestor.....	40
Figura 9. Diagrama de la metodología a realizar.....	43
Figura 10. Montaje de tratamiento 1, prototipo de biodigestor	44
Figura 11. Montaje tratamientos 2 y 3, prototipo de biodigestor	45
Figura 12. Muestra de excretas porcinas frescas e inóculo.....	46
Figura 13. Montaje para producción de biogás, utilizando el método de desplazamiento de agua en probeta.	47
Figura 14. Montaje de tratamiento 2 y 3 en planchas de agitación para homogenizar las muestras.	48
Figura 15. Muestra de biol (200ml) recolectada en cada prototipo de biodigestor	49
Figura 16. Montaje para la medición de concentración de gases usando un medidor multiparamétrico	50
Figura 17. Volumen de biogás producido con respecto al tiempo en días.	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 18. Promedio del pH obtenido de los tratamientos desde la primera toma de datos.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 19. Comportamiento de la presión manométrica del biogás en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado	52

Figura 20. Comportamiento del pH de bioles obtenidos como efluentes en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT) para cada tratamiento aplicado	54
Figura 21. Comportamiento del volumen del biogás producido por día en cada prototipo biodigestor de laboratorio.....	55
Figura 22. Volumen total del biogás producido en cada prototipo biodigestor de laboratorio	57
Figura 23. Análisis comparativo del comportamiento de la producción acumulada del biogás para los tres tratamientos.....	61
Figura 24. Curva de producción de gas metano (mL) en los prototipos de biodigestores escala de laboratorio.....	62
Figura 25. Promedio de concentración de gas metano en el biogás durante la fase experimental en cada uno de los tratamientos aplicados	64
Figura 26. Comportamiento del pH de bioles obtenidos como efluentes en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT) para cada tratamiento aplicado.....	67
Figura 27. Comportamiento del pH de los efluentes de cada prototipo de biodigestor en cada tratamiento.....	68
Figura 28. Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (TDS), en cada uno de los prototipos de biodigestión en laboratorio.....	69
Figura 29. Comportamiento del oxígeno disuelto (OD) en cada uno de los prototipos de biodigestor en laboratorio.....	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de símbolos y abreviaturas.....	12
Tabla 2. Descripción de tratamientos a aplicar en afluentes de los prototipos de biodigestores	38
Tabla 3. Variables analizadas en las excretas que alimentaron el biodigestor.	40
Tabla 4. Variables a evaluar en el biogás.....	41
Tabla 5. Materiales utilizados para el montaje de los biodigestores.....	43
Tabla 6. Composición fisicoquímica de las excretas porcinas utilizadas como afluentes de los biodigestores prototipo en el laboratorio.....	51
Tabla 7. Valores de indicadores fisicoquímicos determinados en los respectivos prototipos de biodigestores de laboratorio-PL.	51
Tabla 8. Producción de biogás en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado	54
Tabla 9. Producción máxima de gas metano (mL) y constante de Michaelis (h) obtenidos a partir de la ecuación cinética de Monod.....	63
Tabla 10. Composición fisicoquímica de las variables presentes en efluentes obtenidos de los biodigestores prototipo en laboratorio	65

Tabla 1. Lista de símbolos y abreviaturas**Símbolos con letras latinas:**

Símbolo	Término	Unidad
pH	Potencial de hidrogeniones	Unidades potenciométricas
CE	Conductividad eléctrica	Ms/cm
TDS	Sólidos totales disueltos	Ppm
d	Densidad	g/cm ³
CO	Carbono orgánico	%
NT	Nitrógeno total	%
CIC	Capacidad de intercambio catiónico	Cmol cationes/kg
Vb	Volumen producido de biogás	MI biogás
Vmet	Cinética de producción de gas metano	MI CH ₄
CH ₄	Concentración de gas metano	Ppm
CO ₂	Concentración de gas carbónico	Ppm
H ₂ S	Concentración de sulfuro de hidrógeno	Ppm
NH ₃	Concentración de gas amoniacó	Ppm
t	Temperatura	°C
HR	Humedad	%
P	Fósforo	%

Símbolos con letras griegas:

Símbolo	Termino	Unidad
α	Intercepto	
β	Velocidad salida de biogás	Kpa
Y_{ij}	Indicadores fisicoquímicos, calidad de biogás.	
Θ_i	Tipo de afluentes o mezclas a evaluar	
μ	Medida poblacional	

Subíndices:

Subíndice	Termino
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ S	Sulfuro de hidrogeno
NH ₃	Amoniaco

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe gran preocupación por el mal uso de los residuos orgánicos y su agotamiento, por lo cual es importante buscar nuevas alternativas de manejo de dichos residuos, como la generación de energía a partir del biogás producto de la fermentación anaerobia de los residuos.

En Colombia la implementación de biodigestores surge de la problemática relacionada con el manejo de las aguas residuales, estiércol y malos olores, lo que puede traer consecuencias como la aparición de enfermedades, contaminación del aire por la presencia de gases generados de la descomposición de la biomasa; por tales motivos la construcción de los primeros biodigestores se dio para el cumplimiento de las leyes con el fin de fomentar los sistemas de producción de energía y biogás (Tellez, 2008).

Se estima que para el año 2007 se llegó a construir entre 5500 y 5700 biodigestores de biodigestión. Sin embargo, al intentar realizar un censo con el fin de tener una cifra más exacta a cerca del número de biodigestores existentes en Colombia ha generado problemas ya sea por la poca información y conocimientos acerca de la operación, construcción mantenimiento e inversión económica de los mismos. El uso de biodigestores es una alternativa viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, que permite la generación de gas, calor y energía, además de la importancia que tiene el uso de residuos orgánicos como las excretas porcinas ya que cuentan con cualidades fertilizantes y pueden llegar a disminuir la contaminación del medio ambiente.

La implementación de un prototipo de biodigestor funcional a escala de laboratorio permite optimizar procesos de biodigestión utilizando afluentes de mejor comportamiento como son las excretas porcinas, ya que los cerdos presentan una baja asimilación de los nutrientes, por lo cual sus excretas tienen una alta carga de sustancias nitrogenadas, al igual que minerales como: fósforo y potasio lo cual permite un adecuado desarrollo para la generación de bacterias y para la producción de biogás.

Para la economía actual es un reto el uso de alternativas sostenibles, para los países con fines de conservación ambiental y por la incorporación a organismos internacionales como la Organización para la cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) la búsqueda de estas alternativas se basa en la implementación de proyectos que permitan la generación de energía renovables a partir del biogás que se genera a través de la degradación de los residuos orgánicos.

La biomasa se define como la materia viva ubicada en la biosfera, que es la capa más fina de la superficie terrestre. A partir de la biomasa residual es posible el aprovechamiento para la generación de energía. La biomasa residual pecuaria se compone de los desechos de la crianza de las diferentes especies animales. Según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) en Colombia las principales especies para cría son, aves, bovinos, porcinos, ovinos, caprinos y búfalos.

Colombia cuenta con gran cantidad de granjas porcinas, las cuales producen residuos orgánicos que representan una condición desfavorable para el medio ambiente, sin embargo, existe la oportunidad para aprovecharlos como una fuente de energía renovable, visualizando variedad de usos tales como la reducción de contaminantes en las descargas de aguas residuales de las unidades pecuarias y la generación de la energía eléctrica.

La recolección de las excretas porcinas es de mayor facilidad y más manejable ya que la mayoría de animales se encuentran en corrales, lo cual es una gran ventaja; al utilizar los biodigestores se pueden obtener beneficios como la producción de abono orgánico con un gran aporte nutricional para las plantas, también reduce la contaminación ambiental al convertir en residuos útiles las excretas de origen animal, reduce el riesgo de transmisión de enfermedades (Mc Garry, 2014) ya que al mantener las excretas en temperaturas internas mayores a 30°C se logran destruir el 95% de los huevos de parásitos y bacterias que causan enfermedades gastrointestinales. Se considera que la energía obtenida de un proceso de aprovechamiento de biomasa de origen animal es limpia, además de tener un bajo costo de implementación.

Por otra parte, las excretas porcinas tienen un gran poder contaminante que puede afectar ambientalmente si no se hace una adecuada disposición final, una de las grandes

problemáticas que tienen las excretas porcinas es la producción en gran volumen y la necesidad de procesarlas rápidamente ya que genera malos olores y contaminación del medio ambiente.

Factores como la alimentación, la composición de los alimentos, vacunación, bioseguridad y manejo hacen que las excretas contengan alta cantidad de elementos biológicos y químicos que son liberados en el ambiente y pueden tener efectos perjudiciales para los ecosistemas, además surge otra problemática importante y es el aumento del volumen del efluente que sale del biodigestor ya que se debe conocer una proporción ideal de agua y excretas de acuerdo con la especie animal (Chacón et al., 2019).

La construcción del primer biodigestor se llevó a cabo en el año 1890 en la India, por la necesidad de obtener energías alternas para las comunidades, luego se empezaron a implementar en otros países asiáticos y en países de Latinoamérica. Se estima que en China se han construido cerca de 30 millones de biodigestores, sin embargo, en países como Costa Rica, México y Colombia solo se han usado con fines investigativos

Latinoamérica es uno de los continentes en los que menos se ha implementado los biodigestores, principalmente por los ambientes con temperaturas muy bajas, lo que altera ampliamente los procesos de biodigestión anaerobia. Otro factor importante que determina el éxito de un biodigestor es el impacto social, la implementación que se le dé a estos equipos y la estrategia de construirlos con materiales de bajo costo (Martí & Herrero., 2019).

En el año 2003, Jaime Martí Herrero, construyó un invernadero para el aislamiento de la temperatura en biodigestores tubulares a 4100 m.s.n.m. Actualmente se siguen estudiando nuevas tecnologías para implementar energías alternas y así poder dar respuesta a la carencia de implementación de equipos basados en la digestión anaerobia aprovechando los residuos orgánicos principalmente de zonas rurales (Mariño, Rivera., et al 2021).

2. JUSTIFICACIÓN

Colombia es un país rico en recursos energéticos, de tipo fósil, como petróleo, carbón y gas natural, que genera ingresos y suple la demanda interna del país. La elevada disponibilidad de recursos hídricos (Rodríguez, 2017) “permite que la mayor parte de la energía eléctrica se obtenga mediante centrales hidroeléctricas, con producciones anuales por encima de los 50.000 GWh en los últimos 5 años”.

Existen diferentes fuentes de energía para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, como restos de cultivo, de alimentos excretas animales, capaces de producir biogás, utilizado en los procesos de cocción, alimentación y calefacción en zonas rurales y en grandes industrias (Rodríguez, 2017) “las granjas de pequeña escala y las comunidades rurales son los más indicados para utilizar eficientemente los recursos locales, y reciclar los desechos generados en los procesos”. En los últimos años, el biogás ha tomado fuerza, ya que es un biocombustible económico, capaz de aprovechar los desechos orgánicos, aportando a la reducción de la contaminación y la disminución de olores indeseables, además de producir energía utilizada para fines térmicos y de iluminación (Arenas, 2019).

Se hace necesario implementar energías alternativas a partir de residuos orgánicos como excretas porcinas, las cuales son de gran interés económico, sanitario y ambiental, y tienen como fortaleza el uso como fertilizante en componentes pecuarios y agrícolas, con el fin de generar iguales o mejores beneficios a menor costo y de forma amigable con el medio ambiente, por ejemplo, el uso de biogás como energía alternativa.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia cuenta con gran cantidad de granjas porcinas, las cuales producen residuos orgánicos que representan una condición desfavorable para el medio ambiente, sin embargo, existe la oportunidad para aprovecharlos como una fuente de energía renovable, visualizando variedad de usos tales como la reducción de contaminantes en las descargas de aguas residuales de las unidades pecuarias y la generación de la energía eléctrica.

La recolección de las excretas porcinas es de mayor facilidad y más manejable ya que la mayoría de animales se encuentran en corrales, lo cual es una gran ventaja; al utilizar los biodigestores se pueden obtener beneficios como la producción de abono orgánico con un gran aporte nutricional para las plantas, también reduce la contaminación ambiental al convertir en residuos útiles las excretas de origen animal, reduce el riesgo de transmisión de enfermedades (Mc Garry, 2014) ya que al mantener las excretas en temperaturas internas mayores a 30°C se logran destruir el 95% de los huevos de parásitos y bacterias que causan enfermedades gastrointestinales. Se considera que la energía obtenida de un proceso de aprovechamiento de biomasa de origen animal es limpia, además de tener un bajo costo de implementación.

Según datos recientes en el mundo más de 1,5 billones de personas no tienen acceso a la energía eléctrica (IEA, 2008) y alrededor de 3 billones de personas cocinan con combustibles sólidos. De estos 2,5 cocinan con biomasa (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, estiércol de ganado y otros) y alrededor de 0,5 billones cocinan con carbón mineral (Sánchez, 2010.)

Por otra parte, las excretas porcinas tienen un gran poder contaminante que puede afectar ambientalmente si no se hace una adecuada disposición final, una de las grandes problemáticas que tienen las excretas porcinas es la producción en gran volumen y la necesidad de procesarlas rápidamente ya que genera malos olores y contaminación del medio ambiente.

Factores como la alimentación, la composición de los alimentos, vacunación, bioseguridad y manejo hacen que las excretas contengan alta cantidad de elementos biológicos y químicos que son liberados en el ambiente y pueden tener efectos perjudiciales para los ecosistemas, además surge otra problemática importante y es el aumento del volumen del

efluente que sale del biodigestor ya que se debe conocer una proporción ideal de agua y excretas de acuerdo con la especie animal (Porkcolombia, 2020).

En Latinoamérica, la construcción de biorreactores tiene un amplio atraso principalmente porque en zonas rurales hay bastante disponibilidad de madera, por el alto costo para la construcción e implementación de biodigestores, además de la poca aceptación e impacto que pueden generar a la población, lo que conlleva a las comunidades rurales que requieren fuentes de energía calorífica y energética, implementar pequeños prototipos de poca inversión y con materiales más asequibles (Porkcolombia, 2020).

Colombia es un país con gran diversidad climática, por tal motivo la construcción de biodigestores en zonas bastante frías puede afectar la actividad del biodigestor y hacer más largo el proceso de fermentación y biodigestión de la materia orgánica, considerando que las temperaturas muy bajas pueden ser un limitante para el adecuado proceso de reacción de los procesos de biodigestión (Mariño, Rivera, & Villanueva, 2021).

Lo que se quiso determinar con este proyecto es, si *¿puede un prototipo de biodigestor a escala de laboratorio producir energía alternativa, con una calidad biofísicoquímicas de efluente similar o igual a los sistemas de Biodigestión ubicados en la zona rural de Fusagasugá?*

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general:

Evaluar la producción de un prototipo de biodigestor a escala de laboratorio y sus efluentes, comparado con los datos obtenidos de sistemas de biodigestión instalados de zona rural de Fusagasugá.

4.2 Objetivos específicos:

- Establecer un modelo de biodigestor experimental a escala de laboratorio funcional para la producción de biogás y derivados.
- Analizar las variables biofísico químicas de afluentes, efluentes y biogás generados durante el proceso de biodigestión de excretas porcinas.
- Comparar los resultados experimentales obtenidos con los datos de efluentes de biodigestores ubicados en zona rural de Fusagasugá.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Marco conceptual

Colombia es un país que cuenta con gran potencial de energías renovables, ya que tiene diversas fuentes de recursos aprovechables y amigables con el medio ambiente. La energía eléctrica en Colombia depende principalmente de hidroeléctricas y termoeléctricas, sin contar las fuentes de energía como la biomasa residual producto del estiércol que se genera en las explotaciones pecuarias. En Colombia se producen cerca de 450.000 toneladas, Sin embargo, al no desecharlos adecuadamente generan contaminación, debido a la explotación extensiva de la cría de bovinos, porcinos y aves principalmente (Chacón *et al.*, 2019).

5.2 Biodigestión anaeróbica:

Es el proceso biológico de descomposición de la materia orgánica sin presencia de oxígeno, en el cual los sustratos se descomponen gracias a la presencia de bacterias anaeróbicas, los principales productos de este proceso son el metano y el dióxido de carbono, con pequeñas proporciones de otros elementos (sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno) que luego dan lugar al catabolismo que permite la degradación de los sustratos en sustancias más simples para la obtención de energías (Velásquez, 2016).

La biodigestión anaeróbica es un proceso bioquímico complejo en el cual influyen parámetros importantes que deben seguirse correctamente para ejecutar cada una de las reacciones químicas, dentro de estos parámetros se encuentran:

Temperatura:

La temperatura contenida dentro del biodigestor es de vital importancia ya que afecta el desarrollo de la flora bacteriana. Las bacterias pueden ser más sensibles a temperaturas bajas (psicrofílico <20°C), lo que podría retardar la producción de gas metano, por lo cual es importante mantener una temperatura constante para asegurar una óptima producción de biogás,

en general se recomienda manejar rangos de temperatura entre los 34°C y 38°C que corresponde a un periodo mesofílico (Arenas, 2019).

pH:

El rango del pH es uno de los parámetros más importantes ya que rangos inferiores a 5.0 y superiores a 8.0 pueden afectar el proceso de fermentación de la materia, el rango apropiado para que haya un correcto proceso de fermentación está entre 6,6 y 7,6 para así obtener un crecimiento óptimo de microorganismos (Arenas, 2019). Cuando el pH es menor a 6.0 los microorganismos metanogénicos generan una acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) disminuyendo el pH y la acumulación de ácido acético. Cuando el pH supera los 8,0 se genera un cambio de amonio a amoníaco, lo que puede llegar a detener la fase metanogénica y provocar muerte celular (Mariño, Rivera., et al 2021).

Tiempo de retención:

El tiempo de retención se define como el tiempo promedio que permanece la biomasa dentro del biodigestor, está ampliamente relacionado con la temperatura, estudios demuestran que cuando la temperatura dentro del biodigestor es alta, el tiempo de retención se reduce, pero si la temperatura es baja el tiempo de retención puede ser más largo, por lo cual se han demostrado algunas teorías de recirculación de la materia, lo que permite que la mezcla se agite y haya una degradación de la materia más rápida, para así obtener tiempos de retención más cortos (García & Gomez, 2016).

Tipo de sustrato:

La composición y volumen del sustrato están relacionados con la velocidad de producción de microorganismos que se formen en el biodigestor. Por lo cual es importante la cantidad de carga orgánica y la proporción del sustrato correcta (Acosta & Obaya, 2005).

Uno de los principales productos de la digestión anaeróbica es el biogás, compuesto en mayor parte de metano y dióxido de carbono y en menor cantidad compuestos como hidrogeno, sulfuro de hidrogeno y oxígeno. Este proceso se caracteriza por la presencia de varias etapas en las cuales intervienen varios grupos de bacterias características en cada fase (Arenas, 2019).

5.3 Etapas de la digestión:

La degradación de la materia orgánica ocurre en varios procesos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Además, actúan diferentes colonias de bacterias anaeróbicas que se dividen en cinco grupos.

5.3.1 *Bacterias acidogénicas:*

Se encargan de catabolizar ácidos grasos y producir hidrogeno y ácidos volátiles. Son de gran importancia ya que se encargan de producir el alimento para las demás bacterias, tienen un crecimiento acelerado con un tiempo de duplicación promedio de 30 minutos (Velasquez C. , 2016).

5.3.2 *Bacterias acetogénicas:*

Se encargan de transformar en productos más simples los productos que no son completamente metabolizados como el etanol y los ácidos grasos volátiles. Las bacterias encargadas de este proceso son principalmente facultativas o anaeróbicas (Amado, 2009).

5.3.3 *Bacterias metanogénicas:*

Estos microorganismos se consideran los más importantes ya que se encargan de la producción de metano a partir de sustratos mono carbonados. Presentan un metabolismo más lento, así que son más sensibles a condiciones de temperatura y de pH (Amado, 2009). Son microorganismos determinantes ya que son los encargados de producir aproximadamente el 70% de metano en la digestión anaerobia.

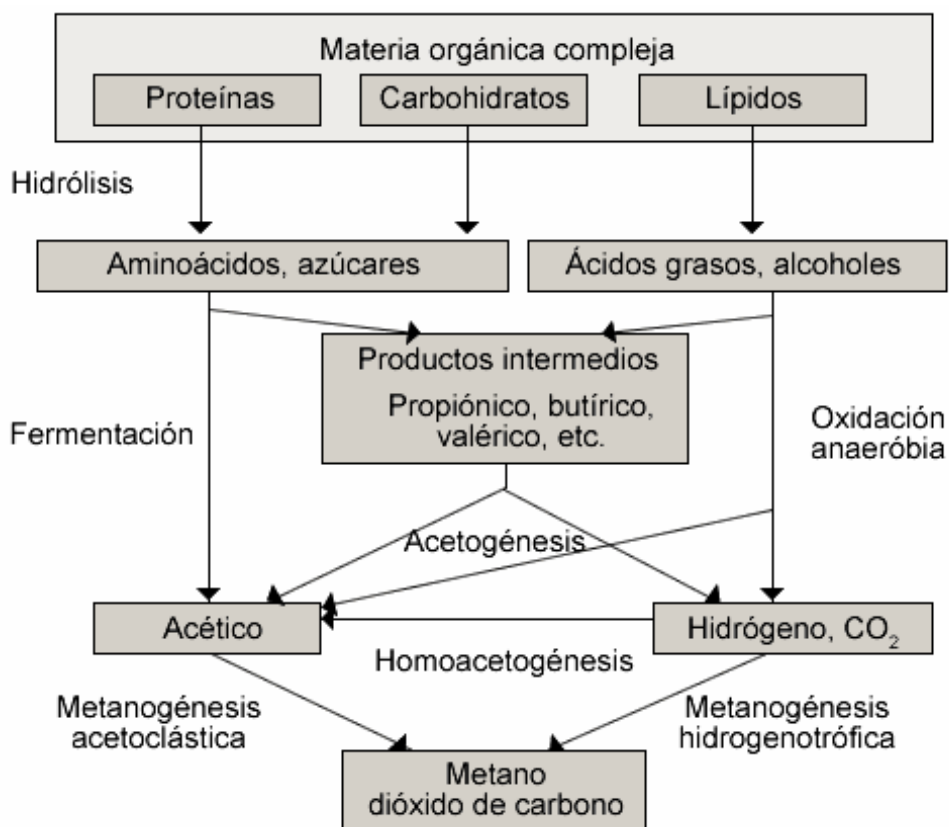
Las bacterias metanogénicas requieren energía para su crecimiento con el fin de originar metano, son esenciales en el proceso de biodigestión ya que la acumulación de productos no gaseosos de la fermentación puede alterar el proceso de degradación de la materia orgánica y disminuirla (Parra, 2015).

5.3.4 *Bacterias hidrogenotróficas:*

Están encargadas principalmente de convertir compuestos de mayor masa molecular como lípidos, proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, entre otros en unos más simples (aminoácidos, monosacáridos), y que sean solubles en agua. (Amado, 2009). Con el fin de ser utilizados como fuente de alimento y energía para las posteriores etapas. Los microorganismos

presentes en esta etapa secretan enzimas que aceleran la degradación de las moléculas más grandes para ser usadas como sustrato (Adekunle & Okolie, 2015).

Figura 1. Etapas de la digestión anaerobia.



Fuente: (Amado, 2009).

5.4 Biodigestor

Se conoce como biodigestor a un sistema cerrado herméticamente, en el cual se almacena material orgánico para ser fermentado. Los residuos almacenados se degradan gracias a la eficaz labor de las bacterias anaeróbicas produciendo energía y biogás, con el fin de aprovecharlos para su uso en las diferentes labores del campo y además como un ahorro energético en zona rural y también urbana. Los residuos almacenados en el biodigestor se transforman en abono orgánico y

energía que es usada como recurso tecnológico en zonas rurales y países en desarrollo (Velasquez C. , 2016).

Los elementos que componen principalmente el biodigestor son:

- Entrada de carga de la materia orgánica.
- Cámara de fermentación de la materia orgánica.
- Cámara de depósito de biogás.
- Sistema para el descargue de gas metano.
- Salida de la materia fermentada.
- Salida de Bioles o fertilizante.

5.5 Modelos de biodigestores

Existen diferentes tipos de biodigestores y se pueden dividir de acuerdo al tamaño y a la cantidad de biomasa agregada. Los biodigestores de pequeña escala son construidos básicamente para la generación de energía y gas natural con el fin de disminuir costos y existen los biodigestores industriales que se caracterizan por ser de alto costo y son capaces de producir energía eléctrica suficiente para sustituir zonas de alumbrado público, además de producir fertilizantes orgánicos que sustituyen los productos comerciales (García, et al., 2017).

Flujo Continuo:

Son cargados continuamente, se construyen con mayor frecuencia verticalmente y se encargan de producciones de alta escala como granjas e industrias. Son usados principalmente para aguas residuales y residuos de agroindustria, producen gran cantidad de biogás (Abello, 2018).

Flujo Semicontinuo:

Son cargados en lapsos más cortos, en promedio de 12 horas o 24 horas o más en cada carga, se utilizan dependiendo la disponibilidad de materia orgánica presente. Los más conocidos son el tipo hindú, chino y Taiwanés (Gómez, 2012). Su uso principal es la producción de bioabono, ya que son implementados en zona rural y cargados con los residuos orgánicos producto de desechos de cocina y heces de animales (Abello, 2018).

Biodigestor de Campana Flotante o hindú:

Está compuesto por una esfera cilíndrica y un depósito de gas móvil en forma de campana flotante en la cual se almacena el gas producto de la fermentación de la materia orgánica.

Biodigestor de Campana Fija o chino:

Está compuesto por una bóveda esférica cerrada, pero con una cámara de gas inmóvil y fija. Aunque tiene costos de construcción más bajos, no hay presión constante de gas debido a la presencia de poros y grietas en el biodigestor.

Biodigestor Tipo Balón o Taiwanés:

Está compuesto de una bolsa o caucho plástico completamente sellado, la parte inferior de la bolsa se llena con la masa para fermentar y la parte restante almacena el gas producido.

Flujo discontinuo:

Son cargados una sola vez y se renueva la materia orgánica cuando ya se haya producido el gas necesario. La fermentación depende de las condiciones climáticas (Castillo, 2011). Se debe vaciar completamente cada vez que se haga el proceso de carga, es fácil de construir y tiene un proceso de digestión rápido (Abello, 2018).

Biodigestores Prototipo Laboratorio:

La búsqueda de energías alternativas limpias en el sector energético ha considerado el uso de los desechos orgánicos ya que tienen un alto contenido de biomasa. Por tal motivo surge el objetivo de diseñar un biodigestor a escala de laboratorio con el fin de reducir el flujo de los desechos y aprovechar la obtención de biogás por medio de la biodigestión de la materia orgánica.

El diseño de un biodigestor a escala de laboratorio tiene varias ventajas, por ejemplo, evita la construcción de zanjas ocupando terrenos, evita la sedimentación de sólidos, que con el tiempo conlleva a una baja producción de biogás (Alvarez, 2013). En zonas rurales pueden generar biogás para suplir necesidades energéticas tales como la generación de calefacción,

además de reducir la contaminación ambiental producida por las excretas, evitando la proliferación de insectos y parásitos (Botero & Preston, 1987).

Figura 2. Biodigestor a escala de laboratorio con matraces.



Dilución en matraces de 1L conectadas con mangueras introducidos en tinas con agua calentada por una resistencia. **Fuente:** (Barrera, 2017).

5.6 Biorreactores:

El biorreactor es el recipiente en el que se realiza el proceso de fermentación, ya sea en estado sólido o líquido. Es importante que este asegure las condiciones óptimas de temperatura y presión para permitir el adecuado crecimiento bacteriano, deben diseñarse entradas que permitan la adición de nutrientes y el control de variables físico químicas (pH, temperatura, presión) pero que eviten la entrada de oxígeno. Existen diferentes tipos de fermentadores o biorreactores y su diseño debe ser apropiado para el crecimiento celular, la diferencia de su construcción depende del requerimiento del cultivo, el microorganismo y el tipo de fermentación.

El diseño de biorreactores para laboratorio surge con el fin de que estos puedan ser escalados para uso industrial. Principalmente buscan aprovechar los residuos agroindustriales y la alta productividad de los procesos biológicos capaces de generar fermentación en un medio

líquido. Sin embargo, los estudios en el diseño de equipos para el desarrollo de la fermentación en medio sólido han sido muy pocos ya que variables como temperatura y oxígeno son difíciles de estimar en dichos equipos, por lo tanto, no han sido aplicados para la construcción de biorreactores a escala industrial.

En laboratorio es común el uso de cajas de Petri o Erlen Meyer en los cuales se controla la temperatura de incubación. A escala de laboratorio se utilizan pequeñas cantidades de medio sólido, mientras que a escala piloto se utilizan desde kilogramos hasta toneladas de medio sólido (Ruiz & Rodríguez, 2007).

Figura 3. Biorreactores del Laboratorio de Bioprocesos del Centro de investigación en biotecnología



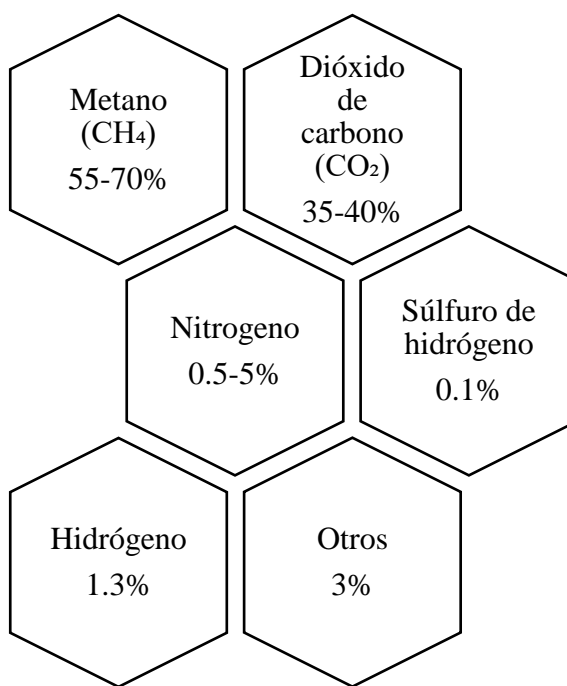
(A. Biorreactor marca Bioengineering 7L con cultivo de microalgas PhD. Andrés Sánchez Kooper) (B. Biorreactor marca Applikon 3L con crecimiento del hongo *Ganoderma sp.* Proyecto doctoral de MSc Catalina Rosales López). **Fuente:** (Rosales, 2019).

5.7 Biogás:

Se define como un gas combustible producto de la fermentación de la materia orgánica, está compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono, y concentraciones más pequeñas de elementos como hidrogeno, nitrógeno, oxígeno y sulfuro de hidrogeno (Valladares, 2017). La forma más eficiente de generar energía es a partir de la materia orgánica, estiércoles, alimentos, vertederos sanitarios o aguas residuales.

El biogás se usa especialmente en granjas, para generar energía eléctrica y calorífica, con el fin de disminuir costos, en zonas rurales se usa como fuente generadora de electricidad para turbinas, energía calorífica para calderas, producción de gas natural y combustible para vehículos. Para la generación de energía eléctrica se requieren motores de combustión, que funcionan con el biogás generado por la digestión anaeróbica, sin embargo, el digester debe tener una reserva de biogás para que los motores se alimenten de esta reserva y funcionen correctamente.

Figura 4. Composición del biogás en porcentajes



Fuente: Autora: (2023).

La formación del metano CH₄ se da luego del proceso de metanogénesis, todos los metanógenos son arqueas estrictamente anaerobias y se dividen en dos grupos:

Hidrogenotróficos: Este grupo de bacterias metanogénicas utilizan hidrógeno y dióxido de carbono para formar el metano.

Reacción de la metanogénesis hidrogenotrófica:

A partir del dióxido de carbono: $4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$.

Acetoclásticas: Este grupo de bacterias utiliza ácido acético, metanol y algunas aminos para formar el metano. Se caracterizan por ser las bacterias que participan mayormente en la producción del metano al descomponer el ácido acético (Cortés, 2019).

Reacción de la metanogénesis Acetoclásticas:

$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$

5.8 Ley de los gases ideales:

Los gases, se definen como el estado de degradación de la materia que no tiene forma ni volumen propio, se componen de moléculas expandidas que permiten la expansión completa de su volumen en el recipiente que se encuentre, se diferencian en varios aspectos de los estados sólido o gaseoso, ya que los gases se pueden expandir completamente dentro de un recipiente y su volumen se especifica respecto al volumen equivalente del recipiente, por lo que son altamente compresibles cuando se ejerce presión sobre algún gas este se contrae con facilidad (Lander & Rivas, 2011).

Los gases mantienen una temperatura ideal cuando tienen una presión baja y una temperatura moderada, lo que quiere decir que la presión varía en proporción inversa al volumen, lo que determina que, si la temperatura es constante el producto de la presión por el volumen también se mantiene constante (González, Tajuelo., et al 2018). La ecuación de la ley de los gases ideales es: directamente proporcional a la temperatura y al número de moles e inversamente proporcional a su presión. La fórmula de la ley ideal de los gases se expresa de la siguiente forma:

$$PV = nRT$$

6. MARCO REFERENCIAL

A continuación, se presenta una revisión de literatura actualizada y relacionada con el tema de investigación:

En el artículo de revisión Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte I excretas de ganado bovino y porcino; reporta el potencial de la energía producto del biogás obtenido de excretas de bovinos y porcinos de la población de Michoacán, México. Con respecto a la producción de excretas se determinó el ahorro de energía eléctrica y también el ahorro económico que esta permite.

Se analizó una base de datos, según el censo agropecuario 2007, con el fin de calcular la cantidad de excretas producidas. La producción de excretas depende básicamente del tamaño del animal y el aprovechamiento de las excretas depende del tiempo que el animal permanezca en el corral. Ocurre el proceso de descomposición anaeróbica de las excretas mediante las fases de digestión de la materia orgánica, permitiendo la producción de biogás. Luego se empleó información del software del modelo de biogás mexicano v.2.0 para el análisis de la generación de la energía eléctrica.

Como resultado se obtuvo que se puede generar energía eléctrica a través de la producción de biogás producto de las excretas de bovinos y porcinos. Lo cual permite un ahorro monetario, disminuyendo los costos de energía eléctrica especialmente del alumbrado público, los afluentes producto del biodigestor fueron destinados a tierras de cultivo que no tenían buen rendimiento lo que sustituye el uso de fertilizantes comerciales.

(Parra, 2015), mediante su investigación titulada Digestión anaerobia: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria, explica el proceso de digestión anaerobia, etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, los microorganismos presentes en cada una de ellas y sus principales usos. Dentro de la metodología, describió básicamente cada una de las etapas de la biodigestión anaerobia y la microbiología de los procesos anaerobios mencionando los grupos microbianos involucrados en cada etapa, resaltó los principales usos del tratamiento anaerobio de las aguas

residuales presentando los principales sectores de alimentos como: industrias cárnicas, láctea, aceites, café, algas e industria de papa. Además, resalto los principales parámetros fisicoquímicos y biológicos que influyen en la digestión anaerobia: amonio, tiempo de retención hidráulico, pH, alcalinidad, surfactantes, velocidad de carga orgánica y presión de hidrógeno.

Se logró concluir que la digestión anaerobia se define como el proceso biológico que no requiere de oxígeno, en el cual la materia orgánica se convierte en metano y dióxido de carbono por medio de las 4 etapas de la biodigestión que interactúan con los diferentes grupos de microorganismos.

(Bautista, 2016), realizó un proyecto que consistió en la elaboración de un biodigestor con un recipiente plástico con capacidad de 6 litros y se adoptó una manguera en la tapa para la recolección del biogás. El proyecto consistió principalmente en la influencia de la temperatura en la producción de biogás a partir de excretas porcinas. Se desarrolló un diseño experimental con 2 tratamientos el primero con temperatura de 35°C y el segundo con temperatura de 26°C. También se analizaron variables como pH (7,58%) porcentaje de sólidos totales (73,52%) relación C/N (11,58). La concentración promedio de biogás se realizó en el día 10 y el día 30 de fermentación de la materia. Con el tratamiento 1, t 35°C se obtuvo 69,4 p/p y en el tratamiento 2 temperatura de 26°C se obtuvo 54,02 p/p. El gas recolectado fue usado para los requerimientos de las lámparas de maternidad de la granja porcina, abasteciendo energía durante 8 horas.

La metodología consistió en primer lugar en la recolección de las excretas porcinas durante 5 días y se realizó el pesaje en una balanza de gancho. Se hizo la preparación de las excretas y se analizaron en laboratorio, se prepararon las muestras y se depositaron en cada prototipo, luego se determinó el efecto de la temperatura en cada tratamiento, con dos replicas cada uno, se determinó la calidad del biogás por medio de pruebas de inflamabilidad y poder calorífico y finalmente se realizó una caracterización del biol.

Se logró concluir la influencia que tiene la temperatura en cada reactor, evidenciando que la temperatura de 35°C influye significativamente en la producción del biogás en comparación con la temperatura ambiente. También es importante resaltar que el tipo de alimentación de los cerdos influye en la composición de las excretas y a la relación C/N y en el nivel de sólidos

totales ya que fue bastante elevado (60,95%) ya que las excretas contenían abundante material fibroso.

García y Gómez (2016), en su investigación, “Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos Vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia” proponen el aprovechamiento de la biomasa residual producto de los residuos de la Central de abastos de Bogotá, evaluando características físicas, químicas y biológicas, por medio de tres tratamientos que consisten en la formulación de tres mezclas compuestas de residuos de frutas, vegetales y estiércol, seleccionando así la mezcla con menor tiempo de retención y con la mayor producción de gas metano.

Se realizó un análisis estadístico (ANOVA) y se concluyó que la mezcla compuesta de vegetales, dio como producto un sustrato que puede implementarse para a producción de biogás ya que tuvo un tiempo de retención de 50 días y una producción de metano del 69,5%, teniendo en cuenta una formulación adecuada de los parámetros fisicoquímicos y el control de los microorganismos.

En un estudio sobre biodigestores Barrera, L (2017) diseño y construyó un prototipo a escala de laboratorio para el análisis de procesos de biodigestión a partir de diversos residuos de biomasa, para tal efecto, se utilizó un modelo de biodigestor de la Universidad de Ciencias Aplicadas Hochschule Offenburg, utilizando residuos como excretas bovinas (EB) y residuos de restaurante como inóculo microbiano (IM), durante el proceso se controlaron variables como: temperatura, pH y dilución estiércol: agua (E:A). así mismo, por medio de pruebas de espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) a las muestras antes y después de la biorreacción fue posible observar grupos funcionales típicos de las fases de la biodigestión anaeróbica como hidrolisis y acidogénesis.

A partir de la caracterización biofisicoquímica de la biomasa se observaron cambios en la concentración de nutrientes del biodigestato y del biol producido en la BDA. En otra investigación Arenas, B (2019) realizó un estudio para participar en el concurso internacional del Solar Declathlon, evento en el que participó la Universidad de la Salle y se enfocó principalmente en la implementación de energías limpias en las viviendas que serían construidas en el municipio de Buenaventura, especialmente de estratos 1 y 2.

El diseño se enfocó en el aprovechamiento de residuos orgánicos, provenientes principalmente desechos de alimento, se realizaron 3 pruebas experimentales por triplicado cada una con diferentes porcentajes de mezclas de residuos. Destacando las propiedades optimas en desechos como cascara de papa, yuca y plátano que bajo las condiciones climáticas adecuadas muestran un porcentaje de eficiencia del 37% con respecto a las otras dos pruebas.

(Martin, 2020), señala que la generación de los residuos orgánicos crece cada vez más a nivel mundial y solo 1% de estos son aprovechados. Sin embargo, su uso busca la producción de energías limpias y la producción de bioabono como alternativa para el aprovechamiento de estos residuos. Su estudio tuvo 3 factores importantes que fueron el recipiente, sistema de calefacción y sistema de agitación.

El prototipo biodigestor se construyó con un tanque de acero inoxidable con una capacidad de 7,4 litros, para mantener el recipiente lo suficientemente caliente se utilizó un serpentín externo, cubierto con una plancha aislante de 3mm para mantener el calor y se utilizó un agitador de tipo helicoidal de 7,7 cm de diámetro y 15,9 cm de largo con el fin de obtener una homogenización útil de los fluidos. La metodología consistió en 3 partes; se considero el diseño de biorreactor determinando las medidas adecuadas de altura, diámetro, agitación y calefacción.

El segundo factor importante fue la construcción del equipo considerando distintos materiales teniendo en cuenta, la temperatura, la presión, la corrosión y el costo del material. Y el tercero fue la prueba del equipo durante un tiempo estimado, determinando la existencia de posibles fugas y el funcionamiento del equipo. Realizando pruebas de elasticidad, temperatura y agitación

Se logró concluir que fue posible la construcción del prototipo de biodigestor con material reciclado, considerando las diferentes pruebas de calefacción y agitación. Además de el correcto funcionamiento de los sensores de temperatura, pH, entrada y salida de lodos y biomasa.

Según (Sandoval, Santacruz., et al 2020) y su investigación titulada Análisis de inóculos microbianos para la optimización de la producción de biogás a partir de fangos residuales, afirma que el manejo adecuado de los desechos en camales rurales como heces, visceras y sangre son ricos en sustratos capaces de producir biocombustibles. Se realizaron diferentes mezclas y tras 28

días de incubación se logró obtener la fabricación de un inóculo capaz de producir hasta un 95,17% de pureza en concentración de metano.

La metodología consistió en el diseño de un dispositivo para la recolección de las muestras, cumpliendo con todos los protocolos de desinfección, se tomaron por triplicado 10ml de cada estrato y se prepararon seis inóculos que se emplearon para los medios de cultivo. Luego se realizó el aislamiento y la identificación de las cepas microbianas, para la medición del volumen de biogás se utilizó el método de Posada, mediante punción con jeringilla a los 7, 14, 21 y 28 días de crecimiento microbiano. Se logró recolectar 36 cepas microbianas, de las cuales solo 7 produjeron el biogás. Se logró concluir que la implementación de cepas microbianas permite el aumento significativo de la cantidad y calidad de los productos de biodigestores sin embargo, es importante la selección de los microorganismos más eficaces.

En la investigación titulada “Desarrollo de un sistema de producción de biogás en un biodigestor de flujo discontinuo en condiciones medio ambientales en Campus, Chía, Universidad del bosque” Parada, Rivera., et al (2021), proponen el desarrollo de un sistema de producción de biogás, teniendo en cuenta el rendimiento de parámetros como pH, temperatura, ácidos grasos volátiles.

Este proyecto se desarrolló en el laboratorio de experimentación agro técnica y energías renovables (LEATYER) Campus Chía en la universidad del bosque. La metodología consistió en el desarrollo de un sistema de monitoreo de las variables fisicoquímicas más importantes, luego se implementaron 3 tipos de aislamiento para los biodigestores, (los sistemas de aislamiento consistieron en la instalación de postes de madera y recubrimiento de plástico, thermolon de 6mm y botellas de plástico rellenas de paja, teniendo en cuenta que los sistemas de aislamiento se usaron en dos de los tres biodigestores) posteriormente se determinó la relación de AGV y alcalinidad del afluente y efluente y por último se elaboró un ANOVA con el fin de determinar que variables afectaron la producción de biogás en el biodigestor. Se utilizaron diferentes sensores y por medio de matrices de decisión se logró determinar los valores de cada uno de los requerimientos de las variables fisicoquímicas de pH, temperatura interna, y gas metano.

Según los resultados obtenidos, el biodigestor con aislamiento de thermolon y botellas PET con paja, obtuvo mayor producción de biogás. Con respecto a los valores de ácidos grasos

volátiles y alcalinidad se encontró rangos superiores a los rangos ideales. Y el ANOVA arrojó un valor de $p < 0,05$ en cada una de las variables estudiadas, lo que representa una diferencia significativa entre cada uno de los tratamientos.

En un estudio titulado “Producción de biogás a partir de la codigestión de estiércol bovino, melaza e inóculo bacteriano, publicado por la revista RedBioLac (Red de biodigestores para Latinoamérica y el Caribe); se realizó la evaluación para la producción de biogás a partir de estiércol bovino, melaza e inóculo bacteriano. La investigación contó con 5 tratamientos, el testigo con estiércol bovino (EB), estiércol bovino más melaza en proporciones de 3, 6 y 9% y estiércol bovino más inóculo bacteriano en proporción del 10%. Cada tratamiento se estableció en un biodigestor de flujo discontinuo tipo batch, se realizó la medición de pH antes y después del proceso de fermentación, durante 150 días. El análisis de datos se diseñó con una base de datos en el paquete estadístico de ciencias sociales versión 12. Se realizó un análisis de varianza y la prueba de separación de medias según Duncan.

Se logró concluir que la producción de biogás fue menor en los biodigestores que contenían melaza e inóculo bacteriano. Sin embargo, el uso de azúcares como la melaza puede acelerar el metabolismo y las bacterias anaerobias pueden usarlo como fuente de energía, lo que reduce el tiempo necesario para producir biogás. Por lo cual se indica que el tratamiento con melaza a 6% obtuvo la mayor producción de biogás, comparada con el tratamiento testigo, ya que el proceso de biodigestión fue más rápido por la mayor disponibilidad de azúcares solubles provocando una degradación del sustrato en menor tiempo.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Localización del experimento:

El proyecto se desarrolló en el laboratorio de Nutrición y Bioquímica de la Facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá, el cual se encuentra ubicado a 65 km de Bogotá D.C coordenadas, 4° 20'14''N 74°21'52'' con una altura promedio de 1765 msnm y una temperatura promedio de 19,4°C y una humedad relativa promedio entre 75% y 83%.

Figura 5. Laboratorio de nutrición y bioquímica de la facultad de ciencias agropecuarias, Universidad de Cundinamarca

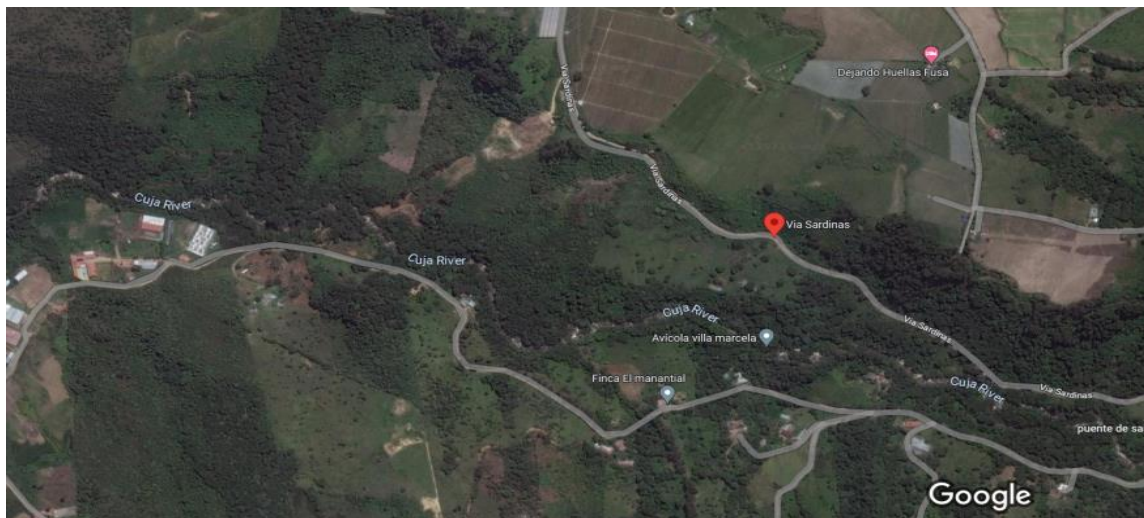


Fuente: Autor (2022).

7.2 Muestras experimentales:

Las muestras utilizadas para abastecer los prototipos de biodigestor en el laboratorio, correspondieron a excretas porcinas recolectadas en el predio Buenos Aires, Vereda Sardinas, municipio de Fusagasugá, Cundinamarca. La recolección de las excretas se realizó en la mañana, con el fin de obtener muestras frescas, fueron escogidas aleatoriamente dentro de las cocheras, recolectando en promedio 10 kg de excretas.

Figura 6. Ubicación Finca Buenos Aires, Vereda Sardinas



Fuente: Google maps (2023).

Figura 7. Sujetos experimentales para la recolección de excretas porcinas frescas.



Los sujetos experimentales fueron cerdos de cruce Landrace x Duroc, de aproximadamente 90 kilos de peso y 18 semanas de vida, alimentados únicamente con alimento comercial. **Fuente:** Autor (2022).

7.3 Tratamientos o muestras utilizadas.

Se utilizaron en diferentes proporciones en cada uno de los tratamientos. Además, se utilizó Inoculo bacteriano (EM) con el fin de acelerar el crecimiento bacteriano. Con el propósito de

evaluar la efectividad del prototipo biodigestor se formularon 3 tratamientos, a partir de mezclas de excretas porcinas e inóculo bacteriano en diferentes proporciones, estos se describen en la siguiente tabla:

Tabla 2. Descripción de tratamientos a aplicar en afluentes de los prototipos de biodigestores

Tratamiento	Excreta porcina (g)	Inóculo bacteriano (g)	Agua (mL)	Aforo Total (g)
T ₁	600	0	2400	3000
T ₂	200	100	700	1000
T ₃	200	200	600	1000

Fuente: Autora (2023).

El inóculo microbiano seleccionado para el proceso de fermentación anaerobia dentro de los prototipos biodigestor estaba compuesto principalmente por los siguientes grupos de bacterias:

Lactobacillus Casei:

Se propuso por primera vez como una especie en el año 1971 (Hansen y Lessel), es una especie probiótica ampliamente estudiada por sus beneficios para la salud, dentro de su taxonomía se ha investigado que muchas cepas dentro del grupo de lactobacilos aplican para cultivos iniciadores y probióticos, por lo cual es importante el análisis del genotipado molecular su evolución y filogenia. La especie LCG, contiene un alto contenido de genes para la utilización de carbohidratos, permitiendo la supervivencia en diferentes entornos, incluyendo análisis fenotípicos y perfiles de fermentación de carbohidratos (Hill, y otros, 2018). Se caracterizan por ser heterofermentadores, al ser productores de ácido láctico, dióxido de carbono (CO₂) y etanol en pequeñas cantidades, se considera una especie mesófila, su temperatura optima de crecimiento

es de 37°C promedio y son anaerobios aerotolerantes, es decir que crecen en condiciones de ausencia de oxígeno, pero pueden resistir al oxígeno (Lifeder, 2022).

Saccharomyces Cereviciae:

Es un hongo unicelular, generalmente de forma elipsoide, su estructura es similar a la de las células eucariotas superiores, están compuestos por 16 cromosomas, contiene aproximadamente 6000 genes, de los cuales más de 5000 son genes codificadores de proteínas. Se caracterizan por producir etanol a través del piruvato en condiciones anaerobias metabolizando sacáridos y acelerando el crecimiento de la biomasa. Se le atribuyen características importantes como el rápido crecimiento en un pH sometido a altas temperaturas, bajo condiciones de estrés y adaptación para fermentaciones a gran escala. La temperatura óptima para el crecimiento microbiano de *S. Cereviciae*, es de 30°C, ya que si hay un aumento mayor a 40°C se induce a un choque térmico. Esta levadura, pertenece a la familia de los quimiorganotrofos, por lo cual no necesitan luz solar ni oxígeno para su desarrollo, son capaces de fermentar la materia orgánica para sobrevivir produciendo CO₂, etanol y glicerol mediante la fermentación alcohólica (Jouhten, Ponomarova., *et al* 2019).

Rhodospseudomonas palustris:

Es una bacteria fototrófica facultativa púrpura sin azufre, que se encuentran principalmente en ambientes acuáticos, tiene una composición fotosintética simple formada por cuatro complejos de proteínas, se caracteriza por su capacidad de utilizar las fuentes de carbono contribuyendo a la función fotoautotrofa de CO₂ asimilando ácidos orgánicos de cadena corta y glicerol crudo en aguas residuales (Luo & Ning, 2022). Esta especie es capaz de producir aminoácidos, hormonas, vitaminas y azúcares capaces de incrementar la población microbiana, puede crecer con presencia o ausencia de oxígeno teniendo en cuenta que su principal fuente de energía en presencia de oxígeno es la luz solar y la energía calorífica del suelo (Morocho & Mora, 2019). Su crecimiento óptimo ocurre con una temperatura promedio entre 30°C y 37°C y con un pH entre 5,5 y 8,0 (Cardona & García, 2008).

Figura 8. *Tratamientos utilizados para la evaluación del prototipo de biodigestor.*



Fuente: Elaboración propia (2023).

7.4 Variables evaluadas:

Las variables que se evaluaron en muestras de afluentes (excretas porcinas) que ingresan y efluentes o bioles de salida del prototipo biodigestor; así mismo, se efectuará análisis de calidad del biogás.

Tabla 3. *Variables analizadas en las excretas que alimentaron el biodigestor.*

Variable a evaluar	Símbolo	Unidad	Metodología
Potencial de hidrogeniones	pH	Unidades potenciométricas	Medidor portátil Hanna instruments
Conductividad eléctrica	CE	Milisiemens /cm (mS /cm)	Conductímetro digital
Sólidos totales disueltos	TDS	ppm	Multiparamétrico digital
Carbono Orgánico	CO	%	Técnica Walkey-Black, por espectrofotometría
Nitrógeno total	NT	%	Método espectrofotométrico y ecuación matemática

Fuente: Autora (2023).

Tabla 4. Variables a evaluar en el biogás.

Variable a evaluar	Símbolo	Unidad	Metodología
Presión del biogás	P	kPa	Manometría con manómetro digital.
Volumen producido de biogás	V_b	mL biogás	Técnica volumétrica por desplazamiento de agua en probeta
Cinética de producción de gas metano	V_{met}	mL CH ₄ / h	Técnica volumétrica con NaOH 5% y aplicación ecuación estado de gases ideales
Concentración de gas metano en el biogás	CH₄	Ppm	Medidor Multiparamétrico de gases digital y portátil

Fuente: Autora (2023).

Las variables que se evaluaron en muestras de afluentes (excretas porcinas) que ingresan y efluentes o bioles de salida del prototipo biodigestor; así mismo, se efectuará análisis de calidad del biogás.

7.5 Diseño experimental:

Los resultados obtenidos se analizaron bajo un diseño completamente al azar (DCA), donde el factor independiente correspondió al tipo y cantidad de afluente con el cual se cargó el biodigestor; el análisis de cada variable se realizó por triplicado; el modelo matemático aplicado a dicho análisis fue:

$$\gamma_{ij} = \mu + \Theta_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

γ_{ij} : Son las variables respuesta o dependientes (indicadores fisicoquímicos calidad del biogás, parámetros biofisicoquímicos de los afluentes o bioles).

μ : Media poblacional.

Θ_i : Es el tipo de afluentes o mezclas a evaluar

ϵ_{ij} : Es el error experimental, relacionado con las réplicas.

7.6 Análisis estadístico:

Se determinaron estadígrafos de tendencia central y de dispersión, también se utilizaron figuras en diagramas de barras que mostraron dichos estadígrafos, así mismo los resultados obtenidos se sometieron a análisis de varianza de una vía (ANAVA), con el fin de determinar diferencias estadísticas significativas entre los promedios de variables dependientes evaluadas en la investigación; por otra parte, se realizaron pruebas de comparación de medias múltiples de Tukey y un análisis de correlación múltiple que determinaron la asociación entre las diversas variables halladas en los respectivos biodigestores. Los datos se evaluaron mediante paquetes de *INFOSTAT (2018)* y *SPSS (2015)*.

7.7 Procedimientos:

Con el apoyo de la Universidad de Cundinamarca y los docentes encargados de este proceso se llevó a cabo la implementación de un prototipo de biodigestor a escala de laboratorio y se basó principalmente en la producción de energías alternativas a partir de desechos orgánicos o en este caso heces de animales ubicadas en la zona rural de Fusagasugá y en la practicidad de obtenerlas en laboratorio. Principalmente se llevaron a cabo los cálculos necesarios para determinar los parámetros fisicoquímicos que se estudiarían, la composición de cada uno de los tratamientos y la selección de un inóculo bacteriano adecuado para la investigación.

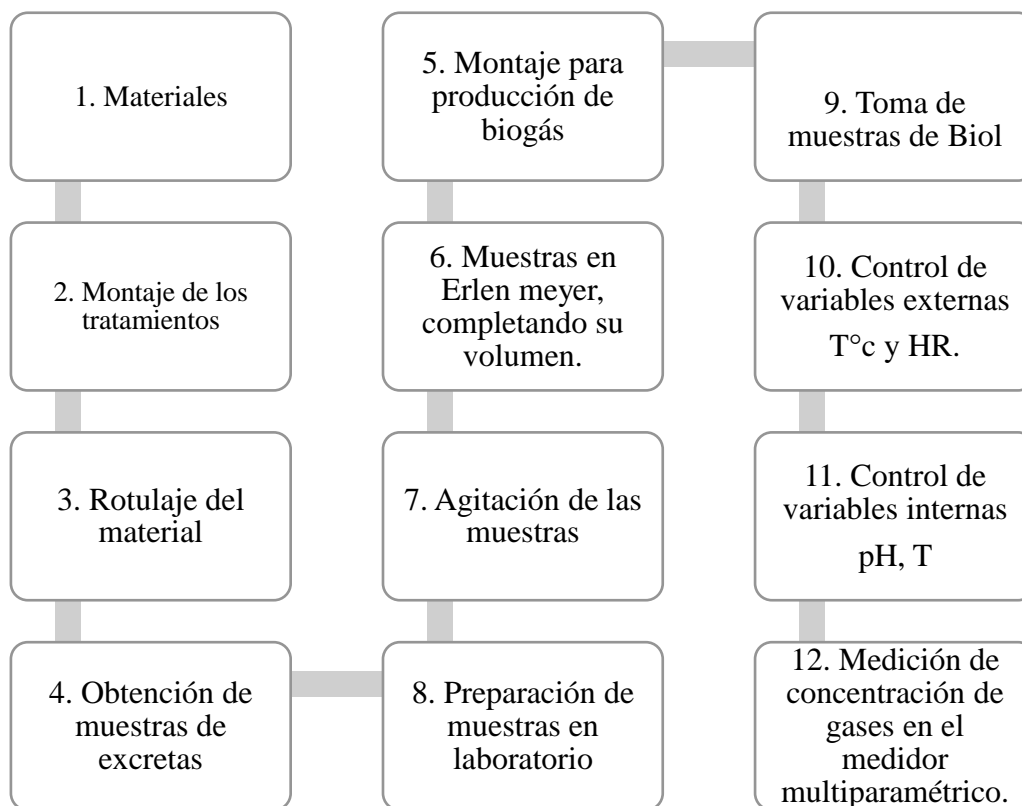


Figura 9. Diagrama de la metodología a realizar.

Fuente: Autora (2023).

7.7.1 Listado de materiales:

Tabla 5. Materiales utilizados para el montaje de los biodigestores

Materiales	Equipos
Recipiente plástico capacidad 10 litros	Termómetros de mercurio
2 frascos plásticos pequeños	Planchas con agitador
Mangueras para canalizar	Manómetro digital
Mangueras gruesas para acoplar	Potenciómetro Hanna HL8424
Tapones de goma	Multiparamétrico
Llaves de PVC	Agitador magnético
Válvula con tapa	Balanza analítica

Botellas PET	Termómetros de mercurio
Probetas de vidrio 250ml	
Erlen Meyer con desprendimiento lateral	
Vasos de precipitado	
3 cubeta de plástico	

Fuente: Autora (2023)

7.7.2 Montaje del prototipo de biodigestor:

El montaje del prototipo de biodigestor se dividió en dos partes:

Primero se construyó el Prototipo de biodigestor del tratamiento 1 (Excretas porcinas y agua). Se utilizó un recipiente plástico con capacidad de 10 litros, con una llave para la recolección del biol. Se aseguró completamente cada entrada de aire al instalar la válvula de ingreso de la materia orgánica y la instalación del sensor del potenciómetro para la obtención de datos de pH y temperatura interna.

Figura 10. Montaje de tratamiento PLT1, prototipo de biodigestor en laboratorio

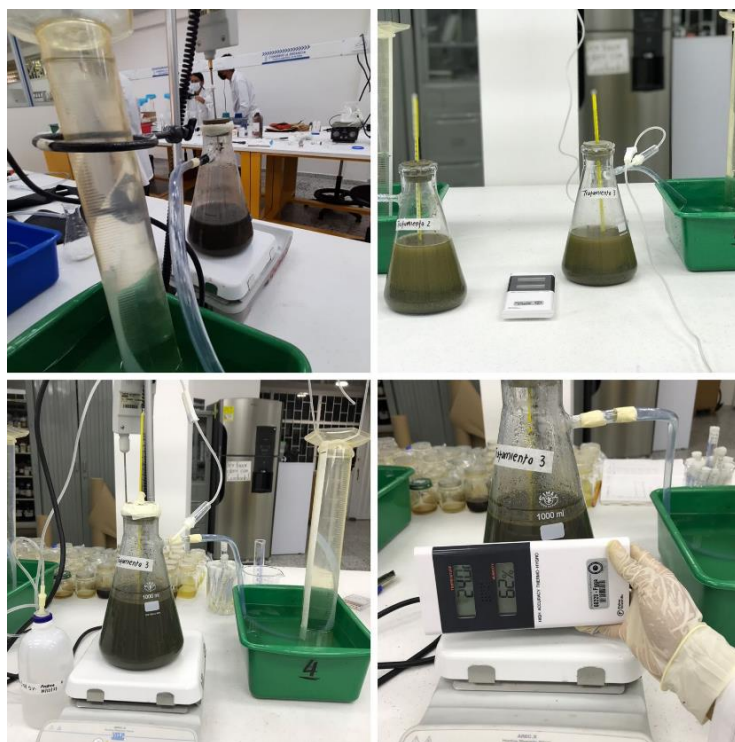


Fuente: Autora (2023).

Para el montaje de los tratamientos 2 y 3 (Excretas, agua y proporciones diferentes de inóculo bacteriano) se utilizaron dos Erlen Meyer con desprendimiento lateral, a los cuales se les adecuó un tapón de goma con un orificio para introducir el termómetro de mercurio y poder controlar la temperatura dentro de cada prototipo de biodigestor.

En el desprendimiento lateral de cada Erlen Meyer se instaló una manguera que conducía al interior de una probeta de vidrio de 250 ml, con la cual se realizó el principio neumático por desplazamiento de agua en probeta. Los tratamientos se colocaron sobre una plancha de agitación con el fin de controlar la temperatura cada cierto tiempo y para que los sólidos estuvieran en constante movimiento y así acelerar el proceso de fermentación.

Figura 11. Montaje tratamientos PLT2 y PLT3, prototipo de biodigestor en laboratorio.



Fuente: Autora (2023).

7.7.3 Rotulaje del material:

Luego de realizar el montaje de los prototipos de biodigestor en el laboratorio, se hizo la rotulación de todo el material como vasos de precipitado, probetas, tubos de ensayo, Erlen Meyer, botellas PET, con el fin de tener organizado el material requerido para cada tratamiento.

7.7.4 Obtención y preparación de muestras:

La recolección de las muestras se realizó luego de tener el montaje de cada prototipo de biodigestor instalado, con el fin de que al alimentar los biodigestores las excretas estuvieran frescas.

Las muestras se recolectaron en la vereda Sardinas, municipio de Fusagasugá, en la Finca Buenos Aires, se recolectaron en promedio 5kg de excretas de porcino frescas y se trasladaron al laboratorio de nutrición animal de la universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Se llevo a cabo el llenado de los biodigestores con la mezcla de excretas, agua e inóculo bacteriano, llevando cada recipiente a volumen, teniendo en cuenta la capacidad de cada biodigestor.

Figura 12. Muestra de excretas porcinas frescas e inóculo



Fuente: Autora (2022).

7.7.5 Montaje para producción de biogás:

Se empleó el método de desplazamiento de agua en una probeta para la recolección de gases. Inicialmente, se llenó una cubeta plástica con agua y luego se procedió a llenar una probeta de vidrio de 250 ml con agua. Posteriormente, se introdujo una manguera en la probeta de vidrio, la cual se conectó al Erlenmeyer utilizado como prototipo de biodigestor y que contenía una mezcla de excretas, agua e inóculo bacteriano. Conforme el gas producido se desplazaba a través de la manguera, se observó un notable aumento en el volumen de agua en la probeta de vidrio.

Figura 13. *Montaje para producción de biogás, utilizando el método de desplazamiento de agua en probeta.*



Fuente: Autora (2021).

7.7.6 Muestras en Erlen Meyer, completadas a volumen:

Los tratamientos 2 y 3 fueron diseñados con Erlen Meyer con desprendimiento lateral, luego de realizar la preparación de las muestras en cada uno de ellos se procedió a llevar a volumen con agua destilada cada erlen Meyer y luego ser sellado con tapones de goma, rodeados de cinta aislante e impedir cualquier entrada de oxígeno.

7.7.7 Agitación de las Muestras:

Cada uno de los prototipos de biodigestor fueron puestos sobre planchas de agitación, que se instalaron desde el primer día del montaje de los prototipos de biodigestor, estas planchas contaban con sensores de temperatura que permitieron monitorear el nivel de temperatura en diferentes horas del día. Los agitadores permitieron mantener la homogeneidad de los fluidos, evitando la formación de espuma y la acumulación de sedimentos que pueden provocar la poca actividad de las bacterias. La velocidad de agitación es importante ya que si se agita muy rápido la mezcla se puede interrumpir el proceso de las bacterias y si la agitación es demasiado lenta el sustrato no logra mezclarse bien con las bacterias.

Figura 14. *Montaje de tratamiento PLT2 y PLT3 en planchas de agitación para homogenizar las muestras.*



Fuente: Autora (2021).

7.7.8 Preparación de las muestras en laboratorio:

Para la preparación de las muestras se destino un espacio limpio dentro del laboratorio de Nutrición y bioquímica de la Universidad de Cundinamarca, libre de contaminantes físicos y químicos. Se realizó el pesaje de las excretas frescas en cada uno de los tratamientos, en una balanza analítica y posteriormente se realizó el cálculo de inóculo bacteriano y agua destilada para cada tratamiento.

7.7.9 Toma de muestras de biol:

Al finalizar el proceso de fermentación anaerobia, se tomó una muestra de biol de 200 ml de cada uno de los prototipos de biodigestor y se refrigeraron para luego realizar los respectivos análisis fisicoquímicos.

Figura 15. Muestra de biol (200ml) recolectada en cada prototipo de biodigestor



Fuente: Autor (2021).

7.7.10 Control de variables externas:

Finalizada la construcción de los prototipos de biodigestor, se inició el control de las variables externas, temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (HR). A diario se hizo recolección

de datos 3 veces, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos y monitorear la temperatura constantemente.

7.7.11 Control de variables internas:

Dentro de cada prototipo de biodigestor se realizó un control de las variables pH y temperatura, con el objetivo de controlarlas e impedir que elevaran o disminuyeran afectando el proceso de fermentación. Dentro de cada prototipo fue instalado un termómetro, para el tratamiento 1 se instaló un medidor de pH y temperatura fijo (Potenciómetro Hanna HL8424) y en los tratamientos 2 y 3 se instalaron termómetros de mercurio sellados con cinta aislante para evitar cualquier entrada de aire al reactor.

7.7.12 Medición de concentración de gases:

La medición de concentración de gases se realizó con un medidor Multiparamétrico, la recolección de datos se realizó en 3 mediciones diarias y se recolectaron datos de: gas metano ($\text{CH}_4\%$), Sulfuro de hidrogeno (H_2S (ppm)), Dióxido de carbono (CO_2 (ppm)) y amoniacio (NH_3 mg/m^3).

Figura 16. Montaje para la medición de concentración de gases usando un medidor multiparamétrico



Fuente: Autora (2021).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Análisis fisicoquímico de excretas porcinas

A continuación, se reportan los valores de composición fisicoquímica, relacionados con las excretas porcinas obtenidas en el predio Buenos Aires del municipio de Fusagasugá, las cuales se utilizaron para abastecer los tres prototipos instalados en el laboratorio de nutrición de U Cundinamarca.

Tabla 6.

Composición fisicoquímica de las excretas porcinas utilizadas como afluentes de los biodigestores prototipo en el laboratorio.

Variable	Valor promedio	SD	%CV
pH	7,70	0,01	0,13
CE (mS/cm)	1,33	27,30	2,05
TDS (%)	1,34	13,08	1,96
CO (%)	14,01	0,10	0,70
NT (%)	0,61	0,10	0,70
C/N	22,97	-	-

CE: conductividad eléctrica; mS: Milisiemens; TDS: sólidos totales disueltos; CO: Carbono Orgánico; NT: Nitrógeno total; SD: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación Fuente: Autora (2023).

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 6, se puede apreciar que la muestra presentó ligera alcalinidad, lo cual está de acuerdo a lo reportado por Bautista, V (2016) quien afirma que las excretas porcinas frescas presentan un rango de pH entre 6.0 y 8.0; La conductividad eléctrica obtenida: 1.33 está en el rango reportado por Gutiérrez, L y Ochoa, L (2019).

Los sólidos totales disueltos (1.34%) corresponden al rango indicado por Gutiérrez, L y Ochoa, L (2019), sin embargo, el valor es inferior a lo encontrado por Gutiérrez, L y Ochoa, L

(2019) (410g /día), en cuanto a carbono orgánico (14.01%) la concentración fue superior a lo hallado por Gutiérrez, L y Ochoa, L (2019), pero inferior a lo reportado por Martí, H, J (2019) quién obtuvo un rango de 17.40%-46.0%.

La relación C/N de 22.97 está por debajo del valor óptimo de fermentación de la excreta porcina, según lo indicado por Martí, H, J (2019), este investigador, afirma que para obtener una buena digestión anaerobia en un reactor, se requiere que dicha relación C/N, corresponda a 30 unidades de carbono por una de nitrógeno; Cuando se analizan los valores del coeficiente de variación para cada variable, se puede observar que los datos son confiables, dado que resultaron homogéneos entre las réplicas halladas.

Tabla 7.

Valores de indicadores fisicoquímicos determinados en los respectivos prototipos de biodigestores de laboratorio-PL.

Indicadores	PLT1 (0.0%IB)	PLT2 (1.0%IB)	PLT3 (2.0%IB)	SD	%CV
T(°C) (Ext)	24.3±6.7	23.8±8.4	24.1±7.2	1.79	7.44
T(°C) (Int)	32.1±5.2	32.9±3.2	33.4±3.8	4.07	10.12
HR (%)	73.8±7.8	68.0±7.5	66.2±6.2	7.18	10.34
P (kPa)	1.018±0.223	1.052±0.300	1.081±0.307	0.28	26.27
pH (bioles)	6.73±0.19	6.21±0.32	6.27±0.33	0.28	4.38

T: Temperatura; HR: Humedad Relativa; IB: Inóculo bacteriano; Ext: exterior; Int: Interior; PLT: prototipo laboratorio con tratamiento; SD: desviación estándar; CV: coeficiente de variación Fuente: Autor 2023.

Según lo mostrado en la tabla 7, se puede apreciar que los promedios de temperatura externa e interna analizados en los 3 prototipo de biodigestores, son relativamente cercanos a los datos analizados por (Arenas, 2019), quien afirma que los valores de temperatura van ligados a las condiciones en las que se encuentre el reactor y a medida que aumenta temperatura se degrada rápidamente el biodigestato, incrementando la producción de biogás, teniendo en cuenta

que se debe llevar un control ya que temperaturas muy altas pueden afectar las reacciones bioquímicas enzimáticas de biodigestión anaeróbica en los microorganismos. Con respecto a lo anterior, (Arenas, 2019), afirma que la optimización del proceso de biodigestión se encuentra entre 29°C y 33°C. Por otro lado, valores de humedad relativa dependen primordialmente de la zona en la que se instale el biorreactor y está ligada ampliamente a la temperatura. Así, en la tabla 7, se observa que HR fue mayor en PLT1, intermedia en PLT2 y mas baja en PLT3, es decir, en cercanías al primer prototipo se presentó mayor contenido de vapor de agua en el ambiente. Teniendo en cuenta que la presión de un gas corresponde a la fuerza ejercida por las moléculas por unidad de área, la cual depende de temperatura y volumen, se aprecia dicha variable en los 3 prototipo de biodigestor implementados en el laboratorio mostro una tendencia de incremento desde 1.018 kPa (PLT1) hasta 1.081 (PLT3), dicho comportamiento posiblemente está relacionado con el aumento de la reacciones de biodigestión anaeróbica por causa de la acción microbiana adicional proporcionada por el inóculo bacteriano; la presión que ejerció cada prototipo se relacionó ampliamente con el volumen de biogás producido por cada uno y con los tratamientos aplicados; un estudio realizado en la Universidad Central de las villas, Cuba, con prototipos de biodigestores similares a los construidos en esta investigación, con mezcla de excretas porcinas y agua, mediante software profesional (SolidWorks, 2014) y basándose en datos reportados por Sánchez., *et al* (2005), correspondientes a presiones de biogás, durante 32 días, se obtuvo el valor más alto de presión a escala de laboratorio: 39,66 Pa equivalente a 0,03966 kPa, es decir, las presiones obtenidas en la investigación superan notablemente a lo encontrado por Sánchez., *et al* (2005), lo cual se puede atribuir al efecto positivo del inóculo microbiano adicionado.

Con respecto a los valores de pH en las muestras de bioles de cada prototipo evaluado, se puede analizar que mostraron una tendencia a disminuir de tal forma que el biol en PLT1 se acercó a la neutralidad, mientras que los bioles de PLT2 y PLT3 exhibieron un comportamiento ácido, esto se puede explicar en virtud del incremento en las fases de biodigestión anaeróbica catalizadas por la acción bacteriana, es decir en PLT2 y PLT3 posiblemente se presentó mayor reacciones de hidrólisis y acetogénesis. Los valores obtenidos en los 3 prototipos de biodigestor son similares a los valores reportados por (Galarza, 2020), quien afirma que los valores de pH, varían con respecto a la fase microbiológica en que se encuentre la mezcla, sin embargo, se

estima que el pH óptimo debe superar los 6,60 pero no los 7,50, ya que un pH demasiado ácido puede provocar la muerte de los microorganismos metanogénicos (Bautista, 2016).

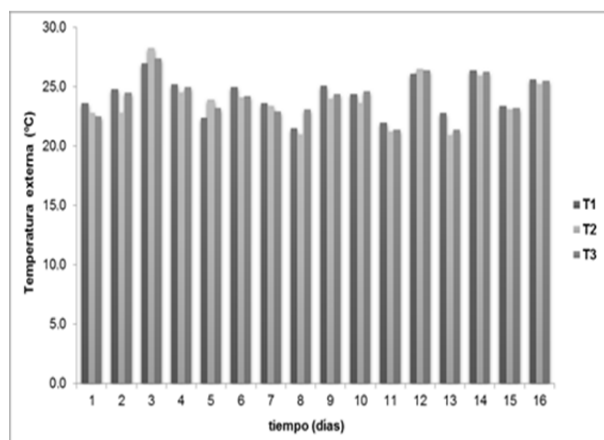


Figura 1: Comportamiento de la temperatura externa de prototipos de biodigestores de laboratorio-PBL

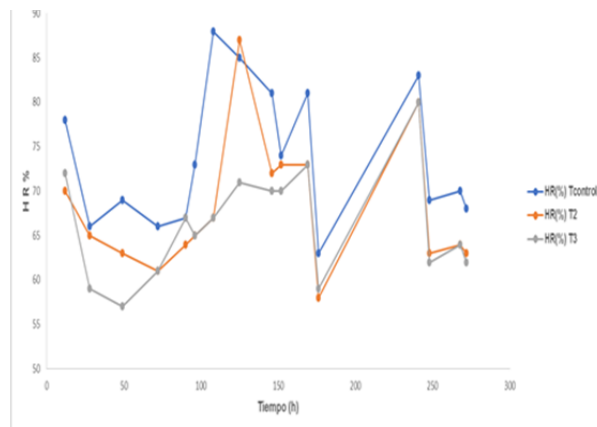


Figura 2: Comportamiento de la humedad relativa externa de prototipos de biodigestores de laboratorio-PBL

La *figura 1*, muestra el comportamiento que tuvo la temperatura externa de cada uno de los prototipos de biodigestor instalados en laboratorio. Se logró determinar que la temperatura en los días 3, 12, 14 y 16 en los 3 prototipos de biodigestor, obtuvo su punto máximo es decir que superó los 25°C, mientras que los días 1, 4, 8, 10 y 13 la temperatura estuvo por debajo de los 20°C. Según (Arenas, 2019), la mayoría de digestores funcionan en la etapa mesófila es decir que se encuentran en un rango de temperatura de 12°C a 35°C. (Arenas, 2019), afirma que lo ideal es que la temperatura no sea muy baja para que la producción de biogás se mantenga constante y demuestre el funcionamiento correcto del digestor. Sin embargo, es aconsejable realizar un control constante de temperatura con el fin de evitar que su variabilidad afecte el proceso de digestión anaerobia y altere la producción del biogás.

La *figura 2*, muestra el comportamiento obtenido respecto a la humedad relativa durante el proceso de biodigestión, de acuerdo a la gráfica, se logró determinar que los rangos de humedad relativa oscilaron entre 60% y 75%. Con respecto a la *figura 2*, se pudo observar que la HR mas alta se evidenció en PLT1 y la HR de PLT2 y PLT3 fue mas baja. Teniendo en cuenta

que esta variación posiblemente se debe a la temperatura ambiental que rodeo los prototipos de biodigestor. Determinando que se encuentra en los rangos de humedad relativa ideal de acuerdo a la zona en que fueron instalados los prototipos de biodigestor en laboratorio que oscilan entre los 70% y 80% en la zona de Fusagasugá teniendo en cuenta la temporada del año.

8.2 Variables evaluadas en el biogás:

8.2.1 comportamiento de la presión ejercida por el biogás:

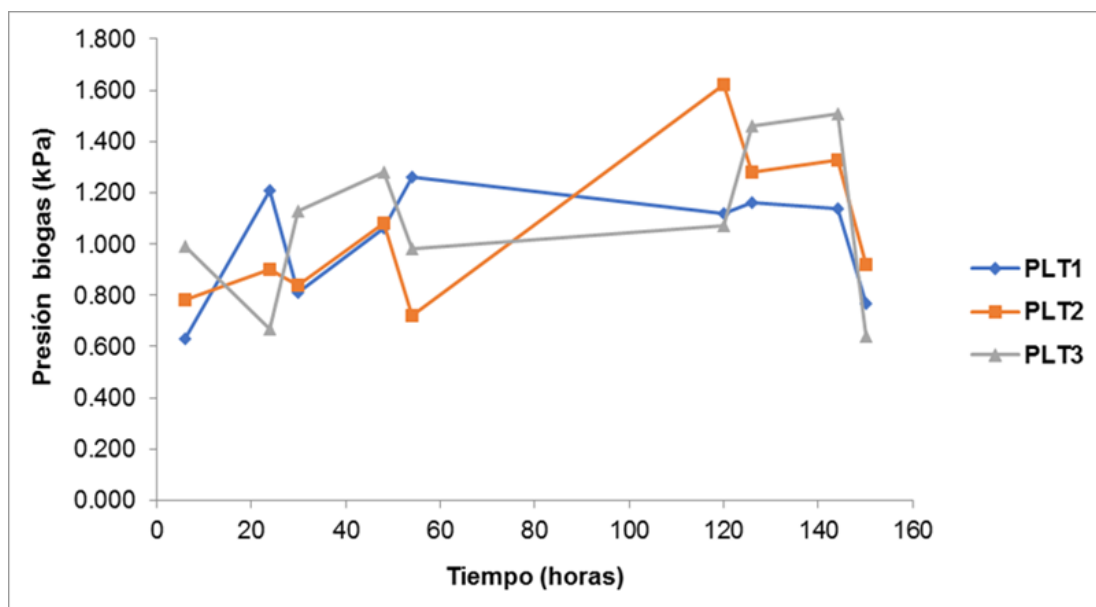


Figura 19: Comportamiento de la presión manométrica del biogás en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado

En la *figura 19*, se puede apreciar el comportamiento de la presión manométrica del biogás en cada prototipo biodigestor en laboratorio. Se logró analizar que la presión que ejercieron las moléculas dentro del biodigestor fue mas constante en PLT1 y mucho más mínima en PLT2 y PLT3. Destacando que PLT2 tuvo un aumento de presión significativo dentro de las 60 y 120 horas, lo que nos permitió conocer que obtuvo mayor producción de biogás durante este lapso de tiempo. También se logró determinar que en los tres tratamientos la presión disminuyó

cerca de las 140 horas ya que el proceso de digestión anaerobia de los microorganismos va disminuyendo lentamente hasta finalizar.

8.2.2 Comportamiento del volumen de biogás producido.

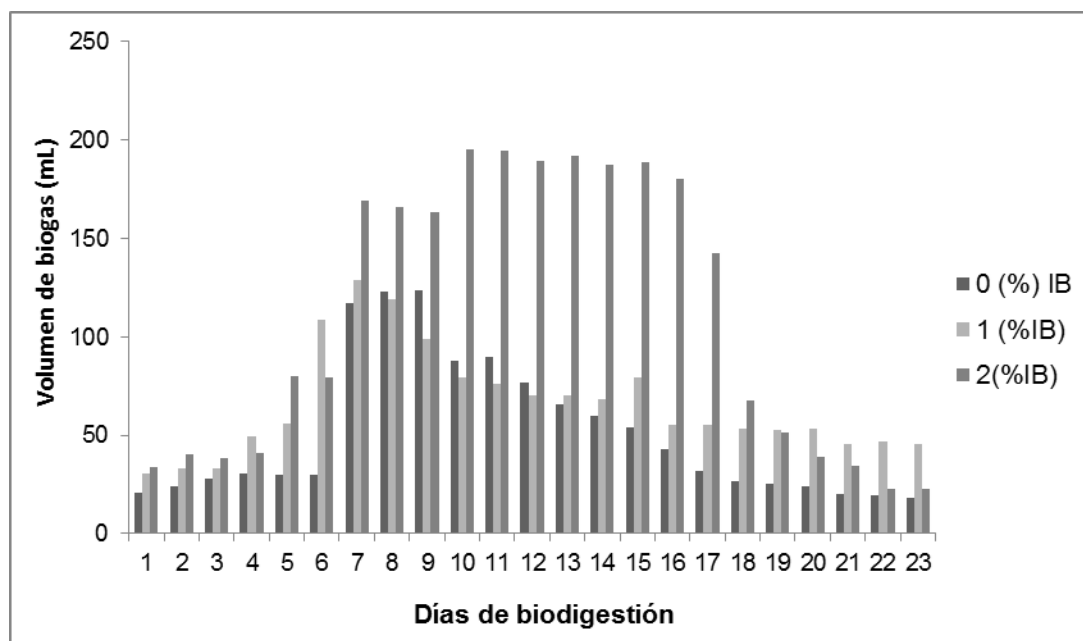


Figura 20: Comportamiento del Volumen de biogás (mL) obtenido por día en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado.

Respecto a lo anteriormente observado en la *Figura 21*, se logró analizar el comportamiento del biogás obtenido por día en cada prototipo biodigestor. Según la gráfica, los primeros 5 días de producción de biogás los 3 tratamientos no superaron los 50 mL de volumen. Sin embargo, según la gráfica, PLT3 desde el día 10 hasta el día 16 aumento significativamente la producción de biogás manteniéndose entre 180mL y 200 mL de volumen, con respecto a PLT1 que no superó los 50mL de volumen, posiblemente a que el biodigestor prototipo control no fue alimentado con ningún inóculo bacteriano, por lo cual el crecimiento bacteriano y el proceso de digestión anaerobio fue relativamente lento comparado con PLT2 y PLT3 que en su composición se añadieron diferentes porcentajes de inóculo bacteriano.

Tabla 8.

Producción de biogás en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado

Tratamiento	Volumen total (mL)	Volumen Promedio (mL)	CV (%)
PLT1	1167	97.25 ± 35.42	36.42
PLT2	1507	125.61± 26.87	21.40
PLT3	2519	209.88 ± 70.34	33.51

PLT: Prototipo de laboratorio con tratamiento; CV: Coeficiente de variación

Con base en los resultados mostrados en la tabla 8 se logró analizar que el proceso de biodigestión anaerobia fue mas eficiente en PLT3, ya que obtuvo una producción promedio de biogás de 2519mL, con respecto a PLT1 con una producción de 1167mL y PLT2 con una producción de 1507 mL. La variación de producción de biogás se debe posiblemente a la tasa de crecimiento de los microorganismos en cada uno de los prototipos.

Al realizar el Análisis de varianza (ANOVA) se encontraron diferencias significativas ($P < 0,50$) entre el valor total acumulado de biogás de los tres tratamientos, marcando una diferencia estadística en PLT3, con respecto a PLT1 y PLT2, es decir que PLT3 superó significativamente a PLT2 (1012mL) de la misma forma que PLT3 produjo un valor total de biogás que supero en (1352mL) de biogás a PLT1. Lo cual se puede atribuir al comportamiento efectivo de las reacciones bioquímicas de los prototipos de biodigestor especialmente las acetogénicas y metanogénicas potenciadas por la acción de las bacterias anaeróbicas presentes en el inóculo bacteriano, es de aclarar que como se mencionó anteriormente grupos microbianos como *Lactobacillus Casei* y *Saccharomyces Cereviciae*, tienen gran incidencia, ya que al ser resistentes a temperaturas altas y a la supervivencia en entornos sin luz solar ni la presencia de oxígeno, permiten un crecimiento microbiano más rápido y al proceso de fermentación anaerobia de la materia orgánica.

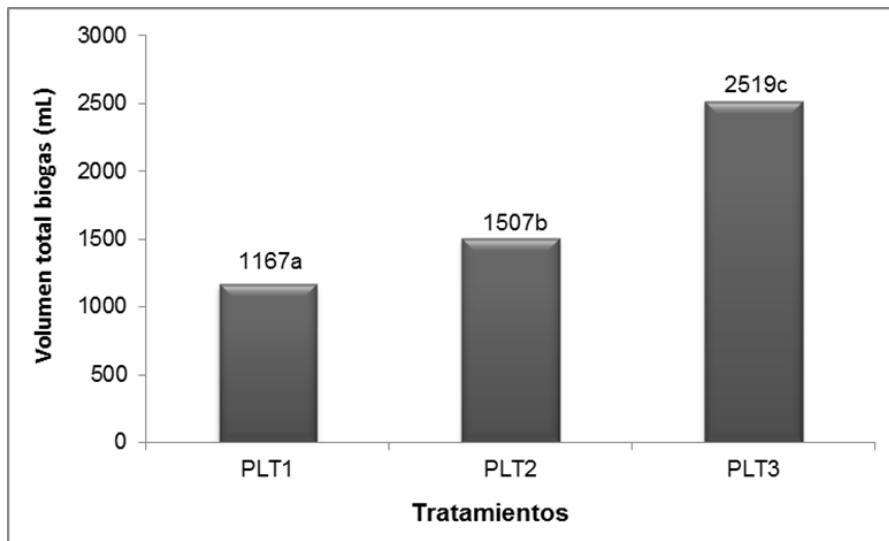


Figura 21: Volumen total de biogás (mL) producido en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado (*^a, ^b, ^c Promedios con diferencias estadísticas ($P < 0.050$) por la prueba Duncan)

La producción de biogás acumulada del tratamiento 1 (1177 mL) fue menor en comparación con los tratamientos 2 (1507mL) y el tratamiento 3 (2519mL), teniendo en cuenta que el tratamiento 1 (control) contenía un volumen de excretas mayor. Esta diferencia se debe posiblemente a que el tratamiento 1, no contenía ningún porcentaje de inóculo bacteriano, el cual tiene la función de aportar microorganismos que aceleren el proceso de fermentación de la materia y la producción de biogás. La producción de biogás de los tres tratamientos se monitoreo durante la misma cantidad de días de biodigestión, teniendo en cuenta las variables esenciales en el proceso de fermentación, afirmando que los valores de temperatura y pH, se mantuvieron constantes en los tres tratamientos. Según (Sandoval, Santacruz., et al 2020) la combinación de microorganismos metanogénicos aumenta la calidad y cantidad de los productos de biodigestión. El metano es uno de los principales compuestos del biogás, la presencia de consorcios microbianos en su metabolismo permiten la degradación de los compuestos orgánicos maximizando la producción del biocombustible.

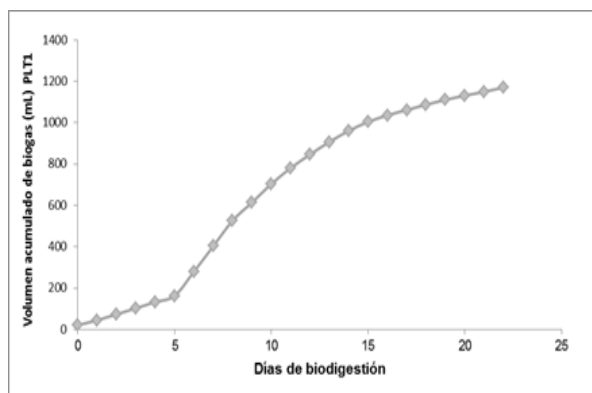


Figura 22.1: Volumen acumulado de biogás (mL) en prototipo biodigestor de laboratorio control, abastecido con excreta porcina, sin tratamiento con inóculo bacteriano

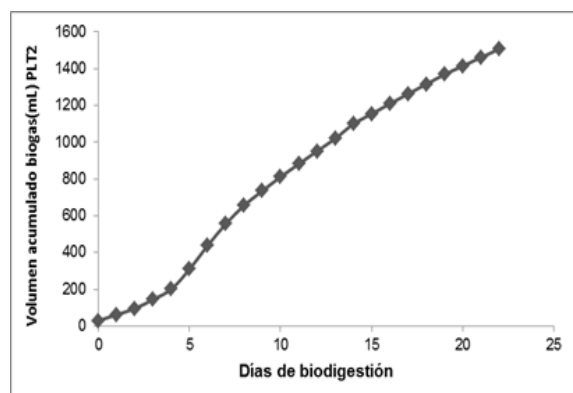


Figura 22.2: Volumen acumulado de biogás (mL) en prototipo biodigestor de laboratorio con afluente excreta porcina tratada con 1.0% de inóculo bacteriano

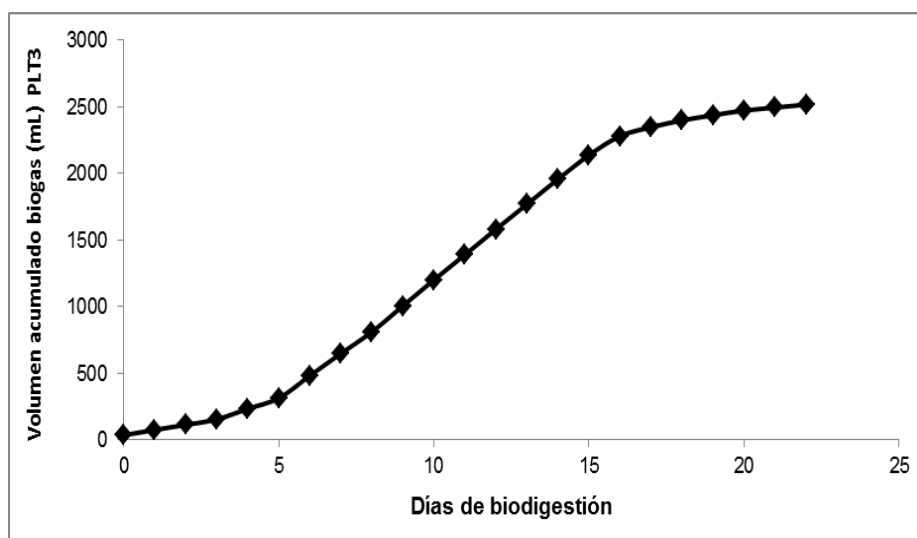


Figura 22.3 Volumen acumulado de biogás (mL) en prototipo biodigestor de laboratorio con afluente excreta porcina, tratada con 2.0% de inóculo bacteriano

Figura 22: Volumen acumulado de biogás medido en mL, para cada prototipo de biodigestor de laboratorio evaluado en el experimento.

En la anterior gráfica, se puede observar el volumen acumulado de biogás en cada uno de los tratamientos desde el primer día del proceso de biodigestión de la materia orgánica. Se logró apreciar que la producción de biogás en PLT1, tiende a disminuir más rápido con respecto a

PLT2 y PLT3, además no se mantiene constante y obtiene el volumen final de biogás más bajo al finalizar el proceso de fermentación anaerobia. Se logra rescatar que PLT2 Y PLT3, muestran un comportamiento sigmoideal es decir que inicia un crecimiento más lento al comienzo y al final luego de un tiempo determinado formando una curva en forma de S, dicha conducta se debe principalmente a la acción de los microorganismos en fase de metanogénesis, ya que, al encontrarse en una temperatura óptima, descomponen el nitrógeno ácido acético aumentando la producción de metano.

8.2.3 comportamiento de la producción acumulada de biogás para cada uno de los tratamientos.

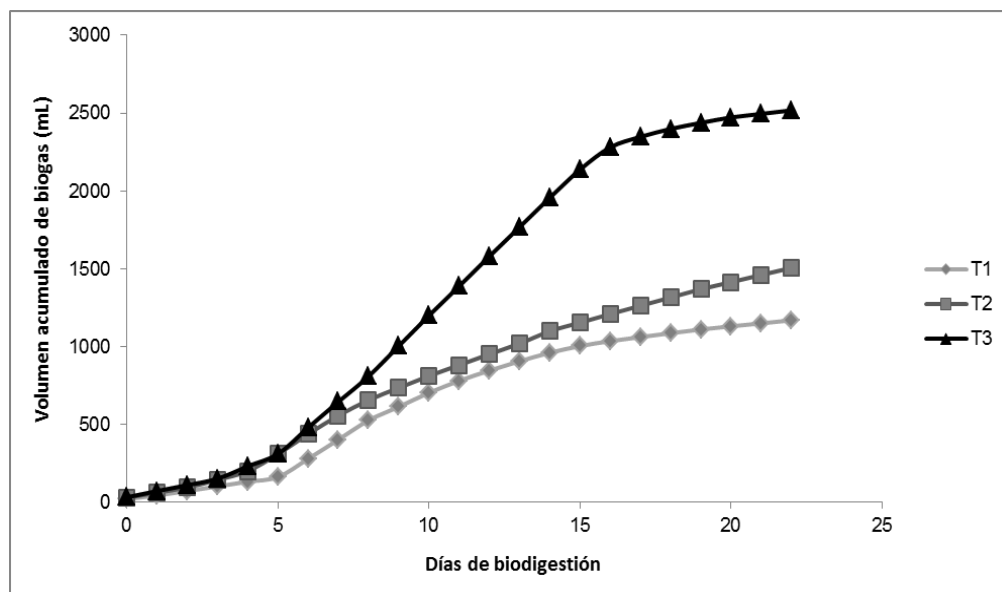


Figura 23: Análisis comparativo del Comportamiento de la producción acumulada de biogás (mL) para los tres (3) prototipos de biodigestores evaluados en el laboratorio.

El *grafico 23*, evidencia que la producción acumulada de biogás fue más constante en PLT3, demostrando un aumento significativo con respecto a PLT1 y PLT2 que no obtuvieron una producción sobresaliente en el proceso de biodigestión. Sin embargo, el aumento de volumen de biogás en PLT3 se produjo luego de los 7 días del proceso de fermentación

anaerobia, luego de que las moléculas contenidas dentro del biodigestor ejercieran presión y así poder producir el biogás, lo cual se puede evidenciar en la anterior grafica. Estos resultados son provocados principalmente por el control de las variables determinantes como temperatura, humedad relativa y pH además de la función que cumplen los grupos de microorganismos presentes en el inóculo bacteriano al encontrarse en un ambiente adecuado es decir sin presencia de oxígeno y bajo las condiciones físico químicas optimas cumplen la función de degradar la materia orgánica correctamente y producir biogás.

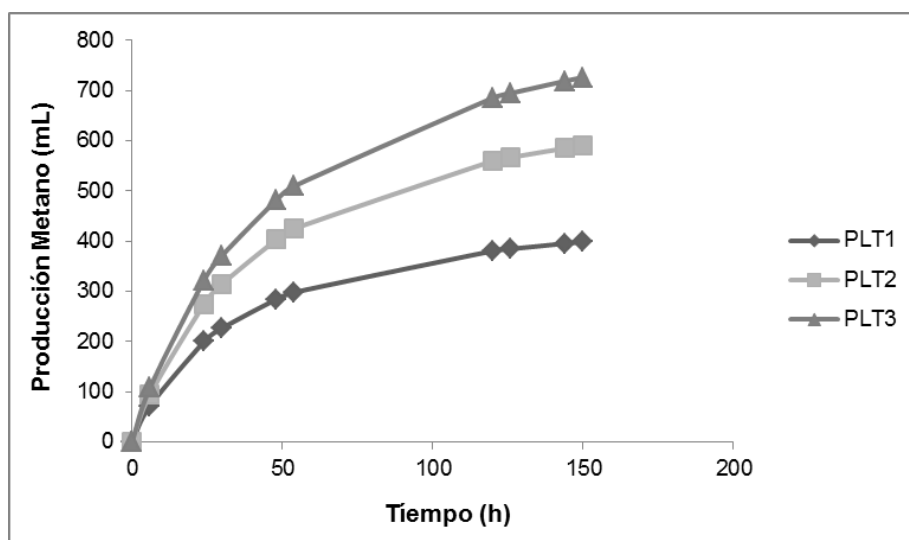


Figura 24. Curvas de producción de gas Metano (mL) en los prototipos de biodigestores escala de laboratorio.

Con base en los mL de biogás y la concentración (%) del metano en los biodigestores, se calculó la producción de CH_4 , obteniéndose lo indicado en la figura 24. En dicha gráfica se puede observar que los biodigestatos presentes en los biodigestores PLT3 y PLT2 generaron mayor volumen de metano, respecto al testigo PLT1, destacándose una marcada tendencia hiperbólica acorde al modelo cinético de Monod (Granados et al, 2022). Es importante anotar que los biodigestores 2 y 3 mostraron una producción alta en todas las etapas del experimento, probablemente causado por la efectividad de las reacciones bioquímicas anaeróbicas bacterianas en la etapa de metanogénesis Acetoclásticas.

Teniendo en cuenta la tendencia anterior se aplicó la ecuación cinética de Monod (1), para encontrar producción máxima de CH₄ ($\mu_{m\acute{a}x}$) y la constante de Michaelis (K_s)

$$\mu_{CH4} = \frac{\mu_{m\acute{a}x} * t}{k_s + t} \quad (1)$$

Donde:

μ_{CH4} = Velocidad específica de producción de gas metano

$\mu_{m\acute{a}x}$ = velocidad de producción máxima de metano

k_s = Constante de Michaelis – Menten

Para proceder el ajuste (Granados et al, 2022), se calculó el inverso de μ_{CH4} y el inverso del tiempo (1/t), luego se graficó y aplicó regresión lineal; con base en la pendiente (β) e intercepto (α) hallados, se determinaron los indicadores cinéticos: $\mu_{m\acute{a}x}$ y k_s , teniendo en cuenta las expresiones 2 y 3:

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{1}{b} \quad (2); \quad K_S = \frac{m}{b} \quad (3)$$

A partir del ajuste realizado a partir de la ecuación cinética de Monod, se obtuvieron los valores cinéticos presentados en la tabla:

Tabla 9.

Producción máxima de gas metano (mL) y constante de Michaelis (h) obtenidas a partir de la ecuación cinética de Monod.

Biodigestores	$\mu_{m\acute{a}x}$ (mL CH ₄ /día)	K _s (día)
PLT1	423.18	54.18
PLT2	592.56	59.04
PLT3	746.64	55.98

$\mu_{m\acute{a}x}$ = velocidad de producción máxima de metano
 k_s = Constante de Michaelis – Menten

De acuerdo a la tabla 9, se señala que PLT3 mostró la velocidad máxima de producción más alta de CH₄ (796.64 mL CH₄ /día), seguida por PLT2 (592.56 mL CH₄ /día) y el más bajo en PLT1, con un valor mínimo de 423.18 mL CH₄ /día, de igual manera, la constante de Michaelis, señala que PLT1 tardó 54.18 horas en llegar a la mitad de la velocidad de producción máxima de gas metano, seguido por PLT3, que tardó 55.98 horas en llegar a esta tasa media, mientras que PLT2 tardó 59.04 horas en obtener la mitad de su producción. Estos resultados están acordes a lo reportado por (Sandoval, Santacruz., *et al*, 2020), dado que el inóculo bacteriano influenció notoriamente las reacciones bioquímicas de biodigestión anaeróbica, especialmente las de metanogénesis acetoclástica.

Finalmente, se calculó el promedio de concentración de gas metano en el biogás durante la fase experimental, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 25:

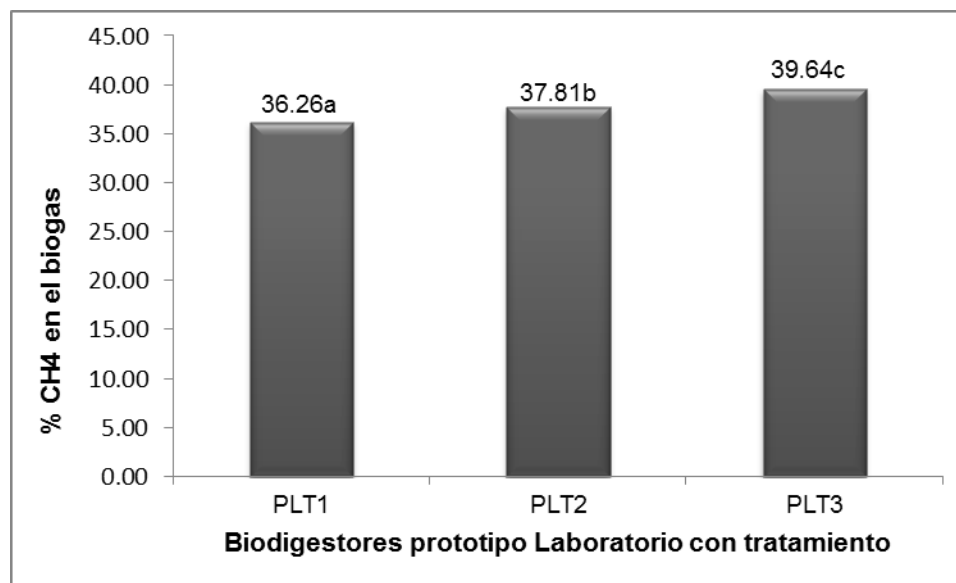


Figura 25. Promedio de concentración de gas metano en el biogás durante la fase experimental en cada uno de los tratamientos aplicados.

En esta figura 25, se observa que PLT3 presentó la mayor concentración de CH₄ (39.64%), seguida por PLT2 (37.81%) y el menor se produjo en PLT1 (36.26%); cuando se realizó el análisis de varianza simple, se obtuvo que se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.050$)

entre los tratamientos, por lo tanto, se evidenció la influencia notoria del inóculo bacteriano en los procesos de biodigestión anaeróbica, optimizando posiblemente las reacciones bioquímicas de metanogénesis acetoclásticas (a partir de la hidrólisis de ácido acético) o hidrogenotróficas (provocando mayor reacción entre H₂ y CO₂).

8.2.4 Composición fisicoquímica de las variables presentes en los bioles obtenidos de cada uno de los prototipos de biodigestores.

Tabla 10.

Composición fisicoquímica de las variables presentes en efluentes obtenidos de los biodigestores prototipo en el laboratorio.

Variable	Unidad	Promedio			SD%	CV%
		PLT1	PLT2	PLT3		
pH	-	7,25±0,04	7,14±0,11	9,11±0,18	0,11	1,31
CE	(μ S)	83,5±0,71	143,5±0,71	226,5±17,68	6,37	3,05
TDS	ppm	41,5±0,71	72±0	113±9,90	3,54	3,49
OD	%	0,85±0,21	1,15±0,21	0,4±0	0,14	14,35
P	ppm	4,95±0,07	5,25±0,07	3,95±0,07	0,07	1,52
P2O5	ppm	11,3±0,14	11,95±0,21	9,1±0,14	0,16	1,53
PO ₄ ³⁻	ppm	15,15±0,21	16±0,28	12,2±0,14	0,21	1,44

CE: conductividad eléctrica, TDS: Sólidos disueltos totales, OD: oxígeno disuelto, P: Fósforo, P2O5: óxido de fósforo, PO₄³⁻: Fosfato (μ S) Milisiemens, ppm: partes por millón.

Con respecto a la tabla 9, se puede apreciar que el valor de pH de PLT1 y PLT2 son similares y se encuentran en un rango neutro, mientras que PLT3, mostró un rango de pH superior a 9,0, lo que quiere decir que esta en un rango alcalino. Esta variación se debe posiblemente a la acción de las bacterias contenidas en el inóculo microbiano, ya que PLT3 tuvo

un porcentaje mayor en la adición de inóculo, lo que puede generar un crecimiento rápido y alterar el pH del biodigestor. Según (Soria, y otros, 2001), en digestores operados con estiércol de cerdo, los valores óptimos de pH oscilan entre 6,70 y 7,50, por lo cual se puede determinar que PLT3 obtuvo un rango de pH demasiado alcalino lo que puede dificultar la absorción de los nutrientes provocando problemas de crecimiento y rendimiento. Por otra parte, la conductividad eléctrica (CE) de los bioles muestreados muestra un aumento significativo en PLT2 (143,5 μ s) y PLT3 (226,5 μ s), (Aguirre & Leal, 2019) señalan que la concentración de sales en el material orgánico se determina a través de la conductividad eléctrica, indicando que valores muy altos de CE pueden afectar la fermentación y provocar problemas de fitotoxicidad en los cultivos, el valor recomendable debe ser inferior a (1 dS/m). Por otro lado, los sólidos totales disueltos (TDS) están compuestos principalmente por (calcio, magnesio, potasio, cloruros y sulfatos) y una pequeña cantidad de materia orgánica, se analizan como indicador de calidad del agua, rangos altos de TDS puede indicar la presencia de contaminantes dañinos como hierro, sulfatos, bromuros y arsénico. Los rangos de TDS ideales se encuentran entre (0-100ppm) indicando un agua ligeramente aceptable. Por lo cual se puede indicar que PLT1 y PLT2 obtuvieron mejor calidad de agua, con concentraciones menores de compuestos inorgánicos. Teniendo en cuenta que las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en aguas depende principalmente de las características fisicoquímicas y la actividad de los organismos en los cuerpos de agua, los rangos ideales en la concentración de OD es de 5,0 mg/L y 4,0mg/L se puede inferir que los valores obtenidos en los tres tratamientos son inferiores a lo indicado por la literatura, teniendo en cuenta que el afluente obtenido de los biodigestores tiene gran cantidad de materia orgánica lo que puede afectar la calidad ideal del agua (Gaitán, 2004).

Con respecto a los valores de fósforo, se conoce que es uno de los requerimientos principales para el crecimiento de las plantas y cumple diversas funciones en el metabolismo energético de las mismas. La composición de bioabono se compone en promedio de 1,5% de fósforo, con un rango aproximado entre 2g a 5g de fósforo por cada kilogramo de materia seca. En el uso de fertilizantes la concentración de fósforo puede ser tan baja alcanzando valores de 1-2 ppm. Los rangos de fósforo obtenidos en la investigación se encuentran entre 4.0 ppm y 5,5ppm, lo que indica un promedio del nutriente muy alto, lo cual puede afectar la absorción de los diversos nutrientes necesarios para las plantas (García S. , 2020).

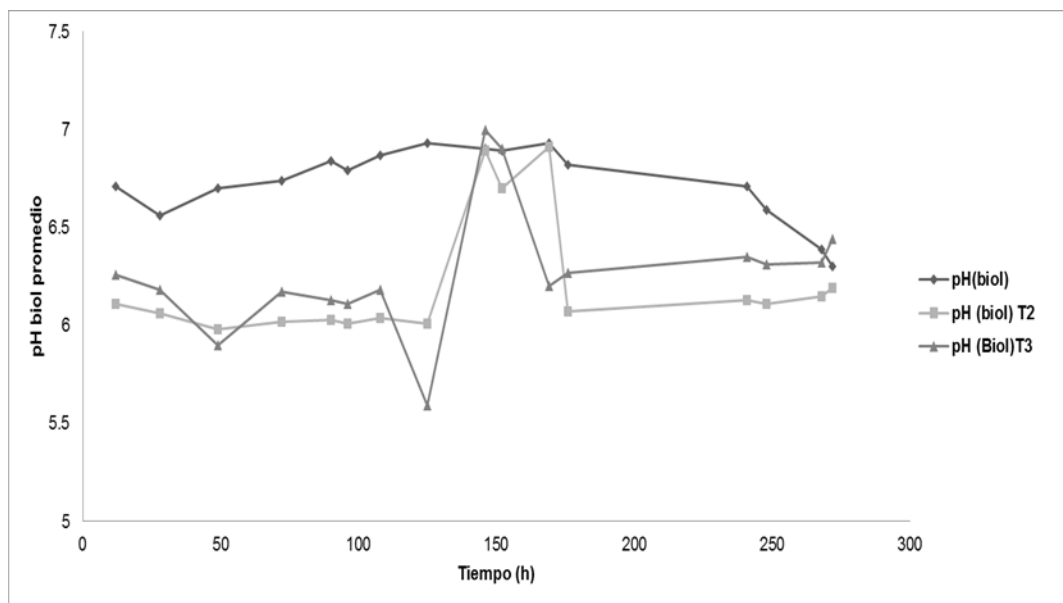


Figura 26: Comportamiento del pH de biogases obtenidos como efluentes en cada prototipo biodigestor de laboratorio (PLT), para cada tratamiento aplicado.

Según muestra la figura 4, el rango de pH del biol obtenido de cada uno de los prototipos tuvo un comportamiento relativamente variable. Teniendo en cuenta que PLT1 obtuvo rangos de pH constantes, entre 6,50 y 7,0 y tiende a disminuir cuando finalizó el proceso de fermentación anaerobia, destacando que el rango de pH que mostró se acerca a la neutralidad, mientras PLT2 y PLT3 obtuvieron rangos de pH desde los 5,5 y 7,0 siendo un poco más variables, pero acercándose a la acidez.

De acuerdo con (Bautista, 2016), la concentración de pH de un digestato porcino se encuentra entre 6,70 y 7,90, para poder ser utilizado como fertilizante para atacar plagas, sequias, heladas o mejoramiento de suelos debido a su alto contenido de elementos como nitrógeno, fósforo y potasio, esto depende de la materia prima utilizada en la alimentación del biodigestor, así como el control de temperatura y tiempo de retención de todo el proceso de biodigestión. (Bautista, 2016) señala que en los últimos días de fermentación el porcentaje de nitrógeno total disminuye en promedio un 90% ya que, en el proceso de degradación anaerobia, los microorganismos consumen el nitrógeno como nutriente, proceso que pudimos evidenciar en los prototipos de biodigestión instalados en laboratorio, ya que en los últimos días de fermentación

los porcentajes de pH disminuyeron notablemente y se mantuvieron constantes. Sin embargo, se logró concluir que PLT1, tuvo un rango de pH, más neutro lo que puede afectar el crecimiento bacteriano e inhibir el proceso de fermentación y producción de biogás lo que nos permitió concluir que los datos de pH obtenido de los bioles de PLT2 y PLT3 fueron los más aptos para su uso como producto del biodigestor.

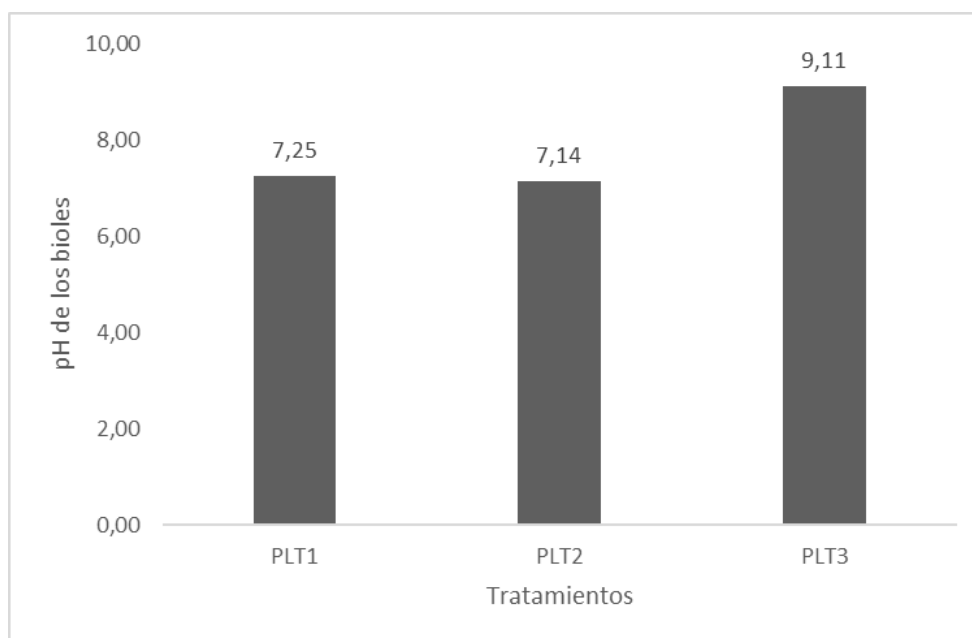


Figura 27. Comportamiento del pH obtenido de los efluentes de cada prototipo de biodigestor en cada tratamiento.

Según lo mostrado en la figura 25, se logró determinar que los valores de pH obtenidos en PLT1 y PLT2 son ligeramente neutros, lo cual favorece cada uno de los procesos del metabolismo de las plantas, pero se debe tener en cuenta la presencia de carbonatos. Por otro lado, el pH obtenido en PLT3 arrojó un valor >9.0 , lo que indica un pH demasiado alcalino, indicando que los nutrientes contenidos en el suelo tienen niveles muy altos lo que puede afectar el crecimiento de los cultivos, comportamiento que se debe principalmente a la presencia de carbonato de sodio, una sal tóxica que puede detener el correcto desarrollo del suelo y posteriormente de cultivos y plantas (Castellanos, 2010).

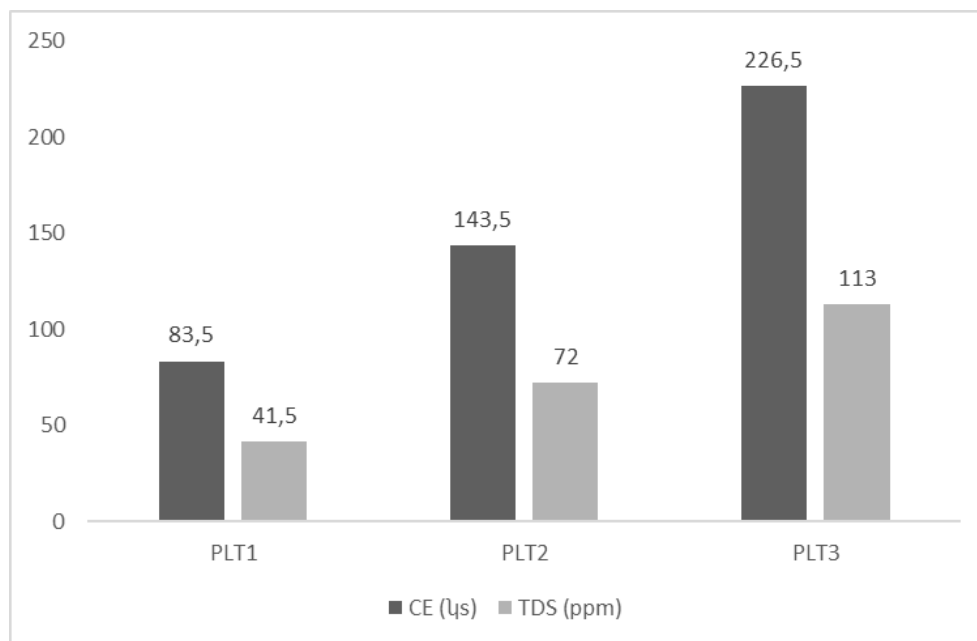


Figura 28. Comportamiento de la Conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (TDS), en cada uno de los prototipos de biodigestión en laboratorio.

Con respecto a lo observado en la figura 26, el comportamiento de la Conductividad eléctrica (CE), en los tres prototipos biodigestor analizados en laboratorio fue muy baja ya que, según (Castellanos, 2010), este parámetro indica la presencia de las sales en el suelo y se expresa en dS/m indicando que los valores adecuados en cuanto a la cantidad de sal en el agua son $<0,4\text{dS/m}$ y $0,8\text{dS/m}$. Según los datos obtenidos en laboratorio los valores convertidos a dS/m, PLT1 obtuvo un valor de $(0,000835\text{ dS})$, PLT2 $(0,001435\text{ dS})$ y PLT3 $(0,002265\text{ dS})$. Concluyendo que, aunque PLT3 obtuvo el rango más alto con respecto a (CE), no se acerca a los valores ideales establecidos por (Castellanos, 2010).

Por otro lado, (Gaitán, 2004), señala que los sólidos totales disueltos son indicadores de la calidad del agua además de contener básicamente toda la suma de minerales, metales y sales, disueltos en el agua, estableciendo que el rango ideal de (TDS) se encuentra entre $(0\text{ppm}-100\text{ppm})$, dicho promedio fue observado en cada uno de los prototipos de biodigestor en laboratorio indicando una calidad de agua óptima para el uso como fertilizante o bioabono para plantas y cultivos.

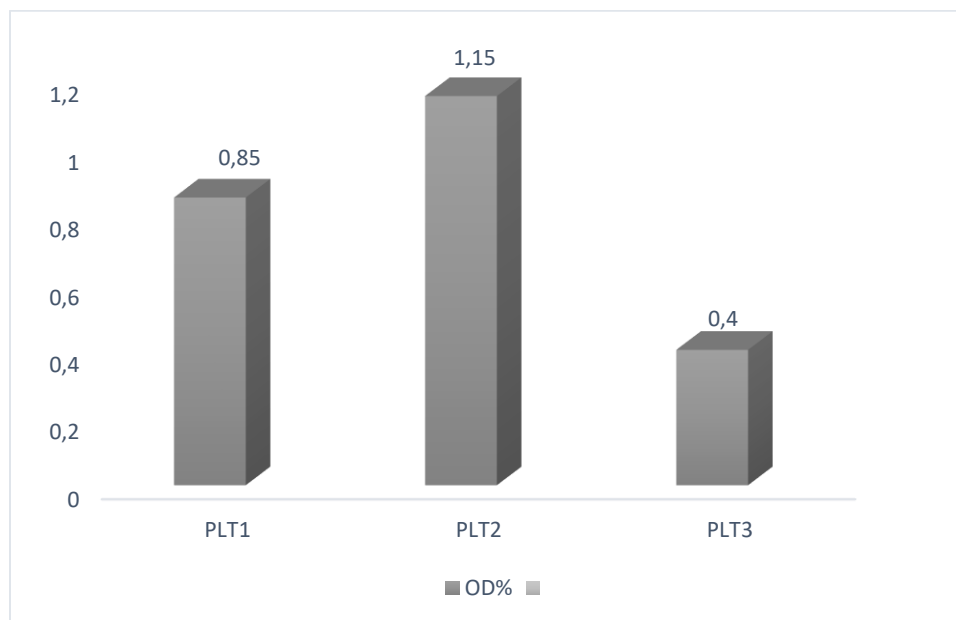


Figura 29. Comportamiento del oxígeno disuelto (OD), en cada uno de los prototipos de biodigestión en laboratorio.

La figura 26, muestra el comportamiento del oxígeno disuelto (OD), en cada uno de los prototipos de biodigestor en laboratorio, evidenciando que PLT3 obtuvo el porcentaje de oxígeno disuelto más bajo en comparación con PLT1 y PLT2 que tuvieron una diferencia entre tratamientos de 0,3 ppm mg/L. Se establece que los porcentajes ideales de este parámetro se encuentran entre 5,0 mg/L y 4,0 mg/L y que un rango $<2,0$ ppm pueden indicar una alta contaminación en el agua, generalmente un alto contenido de oxígeno disuelto indica una buena calidad de agua. Sin embargo, se puede inferir que el adecuado crecimiento de los microorganismos es importante ya que son vitales para la mezcla de los nutrientes y el proceso de fermentación anaerobia, teniendo en cuenta que los valores de oxígeno pueden ser limitados, ya que la construcción del biorreactor evita cualquier ingreso de oxígeno para cumplir con los procesos de biodigestión anaerobia (Ruiz F. , 2018).

9. CONCLUSIONES

1. Se evaluó la producción de biogás en tres prototipos de biodigestores a escala de laboratorio, encontrándose que los dos prototipos PLT2 y PLT1 inoculados con microorganismos tales como: *Lactobacillus Casei*, *Saccharomyces Cerevisiae*, *Rhodopseudonomas Palustris*, generaron el mayor volumen acumulado de biogás en los 22 días que duro el experimento, de tal forma que PLT3 produjo 1012 mL por encima de PLT2, esto demostró que las reacciones bioquímicas enzimáticas de la biodigestión ocurrieron con mayor eficiencia en los dos prototipos tratados con el inóculo bacteriano.
2. Se estableció un modelo de biodigestor prototipo para laboratorio funcional, capaz de producir biogás y efluentes (biol). El montaje del biodigestor permitió el análisis de las diferentes variables fisicoquímicas durante todo el proceso y además ayudo con la obtención de productos derivados del digestor con los cuales se pudo determinar su construcción y funcionamiento con ayuda de materiales económicos y fáciles de adquirir para así obtener la aceptación de futuras investigaciones en laboratorio.
3. Se analizó cada una de las variables fisicoquímicas presentes en los afluentes (excreta porcina) hallándose que pH presentó una ligera alcalinidad, alto contenido de materia orgánica y una adecuada combinación de C/N para el proceso de biodigestión anaeróbica, así mismo los datos presentaron poca variabilidad y alta confiabilidad; en general los indicadores determinados se encontraron en el rango reportado por literatura en investigaciones similares.
4. De acuerdo a los datos obtenidos en los análisis biofisicoquímicos de los bioles (efluentes) se logró determinar que el valor de pH de PLT1 (7,25) y PLT2 (7,15) son similares y se encuentran en un rango neutro, mientras que PLT3, mostró un rango de pH superior a 9,0, encontrándose en un rango alcalino, lo que puede dificultar la absorción de los nutrientes provocando retraso en el crecimiento y rendimiento de las plantas y cultivos.

5. Al realizar la evaluación del comportamiento de biogás en cada uno de los prototipos de biodigestor, se concluyó que el volumen de biogás producido en PLT1 (1167mL) y PLT2 (1507mL) fue inferior al valor obtenido por PLT3 (2519 mL), lo que demostró el comportamiento efectivo de las reacciones bioquímicas de los prototipos de biodigestor especialmente las bacterias acetogénicas y metanogénicas potenciadas por la acción de los microorganismos presentes en el inóculo bacteriano, teniendo en cuenta su resistencia a temperaturas altas y a la supervivencia en ambientes en ausencia de oxígeno.

6. Se realizó la comparación de los datos de efluentes obtenidos en cada uno de los prototipos de biodigestor construidos en laboratorio, determinando que el prototipo biodigestor más eficiente con respecto a la producción de biogás fue PLT3 (2519mL), debido posiblemente a la reacción de las bacterias contenidas en el inóculo microbiano seleccionado durante el proceso de fermentación anaerobia, teniendo en cuenta que el porcentaje de sustrato para PLT3 (200g) fue superior al valor seleccionado para PLT2 (100g), determinando que la combinación de microorganismos metanogénicos aumenta la calidad y cantidad de los productos de biodigestión.

10. RECOMENDACIONES

1. Evaluar producción de biogás y gas metano en prototipos de biodigestores modelo biorreactores alimentados con diferentes tipos de porquinaza proveniente de varios sistemas productivos con mayor control de variables al interior del equipo especialmente en el seguimiento y control de presión, temperatura y pH del biodigestato, a fin de obtener valores con mayor precisión para poder escalarlos a un sistema productivo.
2. Diseñar y establecer un modelo de biodigestor a escala laboratorio que garantice la eficiencia respecto a la producción de biogás y efluentes de buena calidad, basándose en la implementación de materiales de bajo costo y la construcción de un modelo biodigestor que cumpla con los parámetros fisicoquímicos necesarios y el correcto posicionamiento de las válvulas de entrada y salida del biodigestor con el fin de evitar filtraciones y optimizar el proceso de biodigestión y obtener buenos resultados.
3. Realizar análisis de diferentes variables biofísico químicas con el fin de determinar mayor eficiencia en la implementación de biodigestores prototipo en laboratorio, proponiendo iniciativas en torno a su uso en función del mejoramiento de la calidad de vida como fuente de desarrollo en zonas rurales que no cuentan con energías alternativas para proyectar sus producciones pecuarias.
4. Recopilar la mayor cantidad de datos respecto a diferentes investigaciones orientadas a la obtención de efluentes (biol) producto de biodigestores, con el fin de evaluar los rangos ideales de cada variable biofísico química y garantizar efluentes de buena calidad con un pH óptimo para la implementación como fertilizante en cultivos y plantas.

11. BIBLIOGRAFIA

- Abello, A. H. (2018). Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cupula flotante en las zonas rurales y urbanas de la region Norte de Colombia . Barranquilla .
- Acosta, Y., & Obaya, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos Teóricos. Cuba: Revistas científicas de America Latina.
- Adekunle, K., & Okolie, J. (Marzo de 2015). A review of Biochemical process of anaerobic digestion. Umudike, Nigeria.
- Álvarez, G. A. (Mayo de 2013). Control de temperatura y ph aplicado en biodigestores modulares de estructura flexible con reciclado de lodos a pequeña escala. Queretaro, Mexico.
- Amado, K. G. (2009). Codigestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogas.
- Arenas, B. D. (2019). Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura, Bogotá, Colombia: Universidad de La Salle .
- Barrera, L. (Mayo de 2017). Diseño y montaje de un prototipo a escala laboratorio para el analisis de procesos de biodigestión a partir de diversos residuos de biomasa. Bogotá.
- Bautista, V. (2016). Evaluación de la generación de biogás a partir de excretas porcinas en la granja Agroinporc y diseño de un biodigestor. Quito.
- Botero, R., & Preston, T. (1987). Biodigestor de bajo costo para la produccion de combustible y fertilizantes a partir de excretas.
- Castellanos, J. (2010). Guía para la interpretación del suelo y el agua. INTAGRI.
- Chacon, L., Forero, J., Sanchez, J., Reyes, L., & Fajardo, J. (2019). Implementación de un biodigestor de bajo costo para la porcicultura sostenible en la reserva forestal el vergon. Bogota: Universidad Minuto de Dios.
- Cortés, M. (2019). Purificación biológica de biógas por microorganismos metanógenos hidrogenotróficos. México .
- Garcia, A., & Gomez, J. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestion anaerobia. Bogota.
- Garcia, R., Alamo, M., & Marcelo, M. (2017). Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales en la region de Piura .

- Herrero, M. (2019). Biodigestores tubulares, guía de manejo y manual de instalación.
- Hill, D., Sugrue, I., Tobin., C., Hill, C., Stanton, C., & Ross, P. (septiembre de 2018) The Lactobacillus Casei group, history and health related applications.
- Mariño, D., & Rivera, L. V. (2021). Desarrollo de un sistema de producción de biogás en un biodigestor de flujo discontinuo en condiciones medioambientales de Campus Chia, Universidad del bosque. Bogotá.
- Martí, & Herrero. (2019). Biodigestores tubulares, guía de diseño y manual de instalacion. Ecuador.
- Martin, P. (2020). Diseño y construcción de un biorreactor agitado de bajo costo para estudios de digestión anaeróbica a escala de laboratorio.
- Mc Garry, S. (2014). Producción de biogás en un prototipo de biodigestor a condiciones ambientales .
- Parra, R (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. Tunja, Colombia.
- Porkcolombia. (2020). Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia.
- Rodriguez, A. (2017). Los biodigestores, fuente de desarrollo sostenible y calidad de vida en comunidades rurales de Colombia.
- Rosales, C. (2019). Los procesos en la biotecnología: uso de biorreactores para la producción y el escalamiento de productos de interés comercial. Costa Rica.
- Ruiz, L., & Rodriguez, J. (2007). Diseño de bioreactores para fermentacion en medio solido . Revista mexicana de ingeniería química. .
- Ruiz, F. (2018). Estrategia de control para la concentración de oxígeno disuelto en un biorreactor. Bogotá.
- Sanchez. (2010). Importancia de los biodigestores en el desarrollo rural. Cusco.
- Silva, G. M. (2018). Biomasa residual pecuaria como recurso energetico en Colombia . Bogota : Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas.
- Tellez. (2008). Manejo de biol porcino por medio de biodigestor . Rionegro.
- Valladares, F. (2017). Modelamiento del proceso de digestion anaerobica de estiércol vacuno y cascara de cacao. Piura, Perú.
- Velasquez, C. (2016). Uso de biodigestores en la industria pecuaria. Toluca, Mexico.