



**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN
BIODIGESTORES TIPO BATCH PARA EXCRETAS PROVENIENTES DE
GANADO VACUNO, CAMÉLIDO Y EQUINO DE LA UNIVERSIDAD
CIENTÍFICA DEL SUR”**

Tesis para optar el título profesional de
INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:
Juan Ignacio Luna Reyes

Asesor:
Wilfredo Baldeón Quispe

Lima – Perú

2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 29 de noviembre del 2018.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dr. Manuel Efraín Rosemberg Barrón
Integrante: Blga. Mabel Almeida Menchola
Integrante: Ing. Roxana Yanett Díaz Vega

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

Potencial energético del biogás producido en biodigestores para tipo BATCH para excretas provenientes de ganado vacuno, camélido y equino de la Universidad Científica del Sur.

Presentada por el bachiller:

- Juan Ignacio Luna Reyes

Para optar el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**

Asesorada por:

- MSc. Wilfredo Celestino Baldeón Quispe

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple () calificar a:

Integrante 1: Juan Ignacio Luna Reyes			Nota (escrito): DIECISIETE
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Presidente del Jurado



Miembro del Jurado



Miembro del Jurado



Asesor

AGRADECIMIENTO

A todos ustedes que desinteresadamente me apoyaron siempre y me dieron ánimos para continuar cada vez que las cosas se pusieron difíciles, y quienes compartieron conmigo sus conocimientos, tiempo y dedicación.

En especial a mis padres, a mi abuela y a María Belén, porque que sin su apoyo constante y sacrificios no hubiese podido acabarla. Gracias por confiar en mí y alentarme siempre a superar los desafíos que se me presentan, haciéndome una mejor persona y enseñándome el camino correcto para hacer las cosas. Gracias de verdad.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	9
I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivos de la investigación.....	16
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. La energía en el Perú.....	16
2.2. La actividad agropecuaria en el Perú.....	20
2.2.1. Bovinos.....	22
2.2.2. Camélidos sudamericanos	24
2.2.3. Equinos.....	26
2.3. Generación de residuos en la actividad agropecuaria	26
2.3.1. Estiércol ganadero.....	28
2.4. Problemas ambientales generados por la actividad agropecuaria	31
2.4.1. Problemas ambientales generados por el estiércol	38
2.4.2. Alternativas de mitigación.....	40
2.5. Digestión anaerobia	42
2.5.1. Fases de la digestión anaerobia.....	45
2.5.2. Factores que afectan el proceso.....	52
2.5.3. Productos de la digestión anaerobia.....	62

2.5.4. Biodigestor.....	67
III. METODOLOGÍA Y MATERIALES.....	72
3.1. Descripción de la zona de estudio	72
3.2. Diseño experimental.....	72
3.3. Estiércoles de la unidad zootécnica y el centro del caballo peruano de paso de la UCSUR	73
3.3.1. Selección de los estiércoles en base al origen animal.....	73
3.3.2. Caracterización.....	75
3.4. Construcción de los biodigestores tipo batch	75
3.4.1. Materiales	76
3.4.2. Procedimiento para la construcción.....	77
3.5. Variables operacionales	80
3.5.1. Reactivos y equipos.....	81
3.5.2. Medición de las variables operacionales	82
3.6. Cálculos para la carga de los biodigestores.....	85
3.6.1. Relación C/N de las excretas.....	86
3.6.2. Relación materia orgánica - agua	87
3.6.3. Determinación de sólidos totales	88
3.7. Control operacional del proceso de digestión anaerobia.....	89
3.7.1. Monitoreo de la variación temporal de temperatura.....	89
3.7.2. Monitoreo de la variación temporal de pH	89
3.7.3. Monitoreo de la variación del porcentaje de metano en el biogás	90

3.7.4. Periodo de retención hidráulico	90
3.8. Análisis estadístico.....	91
IV. RESULTADOS	93
4.1. Caracterización química de los estiércoles	93
4.2. Carga de los biodigestores.....	94
4.3. Monitoreo del desempeño de los biodigestores	95
4.3.1. Monitoreo de la variación de la temperatura.....	95
4.3.2. Monitoreo de la variación del pH	97
4.3.3. Monitoreo de la variación del porcentaje de metano en el biogás	99
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	102
VI. CONCLUSIONES.....	111
VII. RECOMENDACIONES	113
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
IX. ANEXOS	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principales formas de eliminación de residuos pecuarios.....	19
Figura 2: Contribución de la ganadería al total de emisiones antropogénicas de GEI.....	37
Figura 3: Esquema del proceso de digestión anaerobia.....	48
Figura 4: Biodigestor de tipo batch.....	77
Figura 5: Biodigestores tipo Batch utilizados.....	87
Figura 6: Esquema del biodigestor tipo batch construido.....	88
Figura 7: Esquema del sistema de medición de metano.....	94
Figura 8: Variación de la temperatura durante el desempeño de los biodigestores.....	105
Figura 9: Valores de pH durante el desempeño de los biodigestores.....	107
Figura 10: Variación del porcentaje de metano (CH ₄) en el biogás durante el desempeño de los biodigestores.....	109
Figura 11: Medias del porcentaje de metano (CH ₄) en el biogás por tratamiento durante el desempeño de los biodigestores. Los valores muestran el promedio de 21 repeticiones (n=21). Letras mayúsculas indican diferencias significativas (p<0.05) entre tratamientos.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cantidades promedio de nutrientes contenidos en los estiércoles de distintas especies.....	30
Tabla 2: Composición química del biogás.....	46
Tabla 3: Clasificación de sustratos para la digestión anaerobia.....	53
Tabla 4: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia.....	63
Tabla 5: Materiales y equipos utilizados en la construcción de los biodigestores.....	84
Tabla 6: Variables operacionales monitoreadas antes y durante el proceso de digestión anaerobia.....	89
Tabla 7: Análisis de la composición química de los estiércoles.....	102
Tabla 8: Volúmenes de carga de los biodigestores.....	103
Tabla 9: Cantidades de estiércol y rastrojos de maíz según tratamiento.....	104

RESUMEN

La presente investigación comparó el potencial energético del biogás producido con excretas provenientes del ganado vacuno, camélido y equino de la Universidad Científica del Sur al ser sometidas a un proceso de digestión anaerobia en biodigestores de flujo discontinuo o batch. Para ello se evaluaron los efectos de la temperatura al interior de los biodigestores, el pH y la proveniencia animal de los estiércoles con respecto al tiempo de retención y la concentración de metano en el biogás producido. Se identificó que, al ser operados a la intemperie, en temperaturas promedio de entre 20 y 30 °C, la operación de los biodigestores se mantuvo dentro del rango mesófilo, brindándole estabilidad al proceso y alargándose por aproximadamente 50 días. En cuanto al pH, los valores registrados concordaron con lo descrito por diversos autores como rangos de funcionamiento adecuados, entre 5.2 y 6.3 para las primeras dos etapas (hidrólisis y acidogénesis) y 6.5 y 7.6 para las últimas dos (acetogénesis y metanogénesis) por lo que no supusieron problema alguno. Finalmente, la mayor concentración de metano en el biogás producido se obtuvo en el tratamiento con excretas de ganado vacuno (T1), el cual logró una media de 46.67 %, seguido del tratamiento con excretas de ganado equino (T3) con 44.54% y el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2) con 41.33 %. De esta manera, si bien se observó que el potencial energético del biogás producido con excretas de ganado vacuno es mayor, en términos generales cualquier residuo agropecuario es capaz de generar energía, por lo que la digestión anaerobia de estos surge como una alternativa ambientalmente viable para la generación de energía renovable, permitiendo reducir la huella de carbono que esta actividad tiene sobre nuestro planeta.

ABSTRACT

The present study compared the energy potential of the biogas produced with excreta from cattle, camelids and equines from the Universidad Científica del Sur when they were subjected to an anaerobic digestion process in biodigesters of discontinuous flow or batch. To this end, the effects of the temperature inside the biodigesters, the pH and the animal origin of the manures were evaluated respect to the retention time and the concentration of methane in the biogas produced. It was identified that when they were operated outdoor, at average temperatures between 20 and 30 ° C, the operation of the biodigesters remained within the mesophilic range, providing stability to the process and extending for approximately 50 days. As for the pH, the registered values agreed with that described by various authors as adequate ranges of operation, between 5.2 and 6.3 for the first two stages (hydrolysis and acidogenesis) and 6.5 and 7.6 for the last two (acetogenesis and methanogenesis), so they did not pose any problem. Finally, the highest concentration of methane in the biogas produced was obtained in the treatment with excreta from cattle (T1), which achieved an average of 46.67%, followed by treatment with excreta from equine livestock (T3) with 44.54% and the treatment with excreta of camelid cattle (T2) with 41.33%. In this way, although it was observed that the energy potential of biogas produced with cattle excreta is greater, in general terms any agricultural residue is capable of generating energy, so the anaerobic digestion of agricultural waste in general, emerges as an environmentally viable alternative for the generation of renewable energy, allowing to reduce the carbon footprint that this activity has on our planet.

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años los combustibles fósiles han sido la principal fuente de energía para uso doméstico e industrial; llegando a representar el 81,2 % de toda la energía primaria consumida por la humanidad (Banco Mundial, 2015) y cerca del 95 % de la empleada en el transporte mundial (ONU, 2015). Es por ese motivo que hoy en día los combustibles fósiles aun juegan un papel estratégico en el desarrollo económico a nivel mundial. No obstante, el uso indiscriminado de estos genera severos problemas de contaminación. Ya que permiten la liberación y/o emanación de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO₂), el cual es el principal causante del efecto invernadero propiamente y del calentamiento global.

Moscoso (2010, p.3) sostuvo que “sin duda alguna, los procesos de globalización han generado un alto desarrollo tecnológico y el mundo del petróleo ha cambiado con el paso de los años”. Siendo reemplazado por fuentes energéticas más amigables con el ambiente y de mayor sostenimiento en el tiempo.

Así mismo, autores como Taleghani & Kia (2005), en un análisis técnico-económico realizado a una planta productora de energía a base de biomasa, indican que:

En los últimos años la limitación de recursos fósiles ha forzado a la humanidad a incurrir en la búsqueda de nuevas fuentes para la producción de energía. Tales como la energía solar, la energía eólica, la energía

hidráulica y la proveniente de biomasa (biogás). Todas estas fuentes tienen algo en común; son amigables para el ambiente y provienen de fuentes renovables. Sin embargo, hay algo que diferencia al biogás del resto, y es el simple hecho de que este necesita la recolección de desechos para su producción (abstract).

Reduciendo de esa manera el impacto que las actividades agropecuarias tienen sobre nuestro planeta.

Al mencionar los impactos que estas actividades tienen sobre nuestro planeta, la presente investigación se enfoca en el manejo y tratamiento de los residuos sólidos (RRSS) y, en la contribución que estos tienen para con el efecto invernadero y el consecuente calentamiento global. Esta contribución, generada básicamente por los residuos orgánicos, se debe a las cantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) liberadas hacia la atmósfera por el mal manejo de ellos. Resultando fundamental para mitigar el calentamiento global realizarlo de manera correcta, ya que son estos dos gases los principales responsables del efecto invernadero en la tierra, siendo el CO_2 el gas con mayor contribución relativa (65 % según estimaciones del IPCC), proveniente del uso de combustibles fósiles para producir energía. Seguido del CH_4 (20 % según estimaciones del IPCC, 1996). Siendo las principales fuentes de emisión de este gas la descomposición de basura, los sistemas energéticos basados en petróleo y gas natural, la actividad agropecuaria y el tratamiento de aguas residuales (US EPA, 2000).

En términos de peligrosidad, la contribución global del metano es muy alta, debido al mayor potencial de calentamiento global que este tiene (25 veces mayor que el del CO₂) (Baethgen & Martino , 2001). Es por ello que los proyectos de mitigación de GEI, relacionados con el manejo de estiércoles y el tratamiento de aguas residuales son de particular importancia en América Latina, y es que representan más del 25 % de los proyectos desarrollados en el marco de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) en la región y el 40 % de todos los proyectos de este tipo a nivel mundial. La importancia de empezar a utilizar fuentes renovables y/o menos contaminantes de energía y otros métodos de desarrollo limpio, recae en que la acumulación de residuos sólidos orgánicos está alcanzando niveles críticos en casi todas las regiones del mundo (BID, 2011). Y estos requieren ser manejados sosteniblemente para mitigar las cargas ambientales, y reducir el riesgo para la salud humana, de modo que se mantenga un equilibrio en el ecosistema y se evite el agotamiento de los recursos.

Las alternativas energéticas que pueden dar solución a este problema son técnicas conocidas que lamentablemente no han sido muy difundidas, aun cuando utilizar estas como recurso energético resulta económicamente más viable que seguir haciendo uso de los combustibles fósiles (ONU, 2012). Como se comentó anteriormente, una de esas alternativas, y la que mayor importancia tiene para la investigación realizada, consiste en aprovechar el gas metano (CH₄) que producen los desechos orgánicos al ser descompuestos por microbios en ausencia de oxígeno o condiciones anaerobias. Alternativa que incluso es incentivada por la legislación ambiental nacional, en la cual se menciona como

objetivo de la misma, la promoción del reaprovechamiento ecoeficiente de los residuos sólidos agropecuarios y agroindustriales (MINAGRI, 2012).

Este gas (CH_4) es un hidrocarburo básico más ligero que el aire y con la particularidad de ser incoloro, inodoro e inflamable (Messer, 2010), que si no es bien manipulado y es liberado libremente al ambiente, resulta ser uno de los gases responsables del efecto invernadero y el posterior calentamiento global; sin embargo, si se maneja de manera correcta, resulta beneficioso ya que obliga al generador de residuos orgánicos y agropecuarios a realizar un manejo apropiado de estos, reduciendo la emisión de GEI causada por la descomposición a la intemperie de los mismos y disminuyendo a su vez la contaminación que ejercen sobre los recursos hídricos, atmosféricos y continentales (suelo principalmente). Todo ello en busca de aprovechar el poder calorífico y el potencial que tiene este gas combustible limpio y eficiente para generar energía, siendo fácilmente un sustituto a la gasolina, diésel, carbón y otros combustibles provenientes de fuentes fósiles y que también generan la emisión de GEI (Carmona, Bolívar, & Giraldo, 2005).

En la mayor parte de los procesos de degradación anaeróbica de materia orgánica se produce este gas. Esto se debe a la acción de bacterias metanogénicas capaces de descomponer las largas y complejas cadenas orgánicas para generar metano, también conocido como biogás, y generar también compuestos sólidos y líquidos con alto contenido de nitrógeno conocidos como biosol y biol (Manahan, 2006), los cuales son utilizados como fertilizantes orgánicos debido a su composición de nutrientes esenciales para el

desarrollo de las plantas, que a su vez reducen también el uso intensivo de agroquímicos en los cultivos, añadiéndole un valor agregado a la producción de biogás como tal (Carhuancho, 2012).

En el Perú, la investigación de temas relacionados a la digestión anaerobia de excretas y la producción de biogás no están del todo desarrollada, si bien actualmente existen algunos biodigestores instalados y funcionando en ciudades como Lima y Arequipa principalmente, son pocos para la capacidad que tiene el país de generar energía a partir de residuos orgánicos. Ya que, en base a la información arrojada por el INEI en el año 2012, el 30,1 % del total de la superficie del territorio nacional y el 32,5 % de la Población Económicamente Activa (PEA) está dedicada al desarrollo de la actividad agropecuaria (INEI, 2013). Tomando eso en consideración se señala que el potencial que tiene el Perú para generar energía a partir de residuos agropecuarios es grande, lo cual, acompañado de la posibilidad de manejar de manera sostenible los residuos orgánicos, disminuyendo el uso de combustibles fósiles para dar paso al uso de combustibles renovables (Demirel & Scherer, 2009) y reducir la emisión de GEI, resultó un punto fundamental para realizar la presente investigación. La cual realizó el proceso de digestión anaerobia en biodigestores de tipo batch, también conocidos como de flujo discontinuo o de una sola carga, y el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos (temperatura y pH) de tres sustratos: excretas de ganado vacuno, ganado camélido y ganado equino para determinar el potencial de generación de energía del biogás producido, en otras palabras, la concentración de metano (CH₄) del mismo.

1.1. Objetivos de la investigación

General

- Comparar el potencial energético del biogás producido en biodigestores tipo batch para excretas provenientes de ganado vacuno, camélido y equino de la Universidad Científica del Sur.

Específicos

- Analizar la relación C/N inicial de las diferentes excretas.
- Adaptar el diseño y construir los biodigestores según las necesidades.
- Determinar el comportamiento de la temperatura y el pH del proceso para las condiciones dadas.
- Determinar el periodo de retención hidráulico del proceso para las condiciones dadas.
- Comparar la calidad del biogás generado según la procedencia animal de la excreta.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. La energía en el Perú

El Ministerio De Energía y Minas (MINEM, 2016) indica que “el sector energético peruano tuvo un importante crecimiento en la última década, ligado al incremento de la demanda interna como consecuencia del desarrollo económico que tuvo el país durante los últimos años”(p.1).

Según el MINEM (2014a) “la matriz energética del Perú, se compone en un 80 % de hidrocarburos, principalmente gas natural. El mismo que se masificó desde que se inició su uso, convirtiéndose en una de las principales fuentes de energía

para el transporte nacional, la industria y la red eléctrica doméstica”, sin embargo a pesar de que este tipo de fuentes energéticas resultan fundamentales hoy en día para la industria nacional, resultan perjudiciales para el ambiente, ya que producto de la utilización y combustión de fuentes energéticas fósiles como los hidrocarburos y el gas natural para generar energía, se emiten gases de efecto invernadero a la atmosfera, lo cual incrementa cada vez más al calentamiento global que hoy en día aqueja al planeta Tierra.

Por ello, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y proteger el ambiente, en 2008 se inició el desarrollo y promoción de los Recursos Energéticos Renovables (RER) y la energía eléctrica en el país, promovidos con el Decreto Legislativo 1002, el cual motiva la inversión para la generación de electricidad con el uso de RER. Iniciativa que hasta el momento ha generado que se tengan instalados en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) 96 MW de origen solar, 240 MW de origen eólico y 80 MW provenientes de biomasa y biogás (MINEM, 2016). Permitiendo diversificar la matriz energética con la introducción de estas fuentes RER, que, si bien aún son poco significativas para la cantidad de energía necesaria, lo que se busca es que la participación de estas se incremente permitiendo aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (OSINERGMIN, 2016).

En cuanto a la cobertura de energía eléctrica a nivel nacional, MINEM (2014b) señala que esta “se incrementó con los años, llegando en 2013 a un 90,3 %. Sin embargo, se espera que llegue a valores cercanos al 100 % en 2025. Todo esto se lograría a través de una mayor conexión del SEIN”, así como implementando sistemas de generación eléctrica fuera de la red (off-grid) en zonas rurales a

través de fuentes RER, tal como la energía generada a través de la biomasa. La cual, debido al potencial que tiene el país de generarla en zonas rurales, juega un rol importante a la hora de intentar conseguir ese objetivo.

Actualmente, el único sistema de energía renovable generada a base de biogás (producido con biomasa) que viene trabajando y es de magnitud medianamente importante en el país, es el instalado en el relleno sanitario de Huaycoloro, construido y operado por la empresa Petramás, el cual convierte aproximadamente el 42 % de los residuos sólidos generados en Lima Metropolitana en energía eléctrica que luego es suministrada al SEIN.

No obstante, en virtud de lo señalado anteriormente, el potencial que tiene el país para generar energía a partir de fuentes renovables es grande. Sin embargo, tal como se observa en la Figura 1, en la actividad pecuaria, este no es aprovechado, ya que los residuos son dispuestos de otras formas, sin tomar en cuenta el potencial energético que estos tienen, tanto para beneficiar a las personas que realizan directamente la actividad como al medio ambiente.

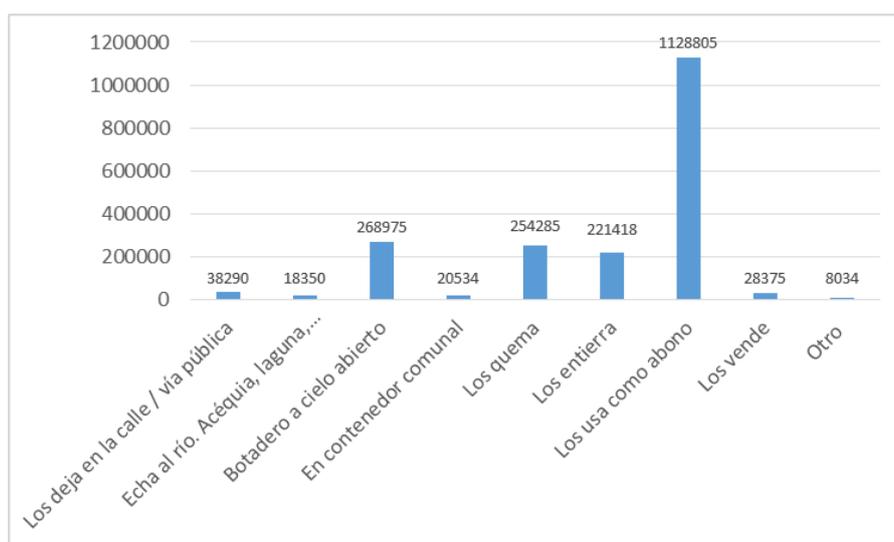


Figura 1: Principales formas de eliminación de residuos pecuarios

Fuente: (INEI, 2013)

Debido a ello y a la importancia de mejorar en cuanto a temas energéticos y ambientales se refiere, actualmente algunos proyectos e iniciativas de mitigación frente al cambio climático que resultan interesantes respecto al aprovechamiento de fuentes RER de este tipo se encuentran en cartera del MINAM (2016), entre ellos se destacan los siguientes:

La planta de biogás con compresoras y calderos adaptados que aporten soluciones a la industria agropecuaria y a la hipotermia en viviendas de zonas altoandinas propuesta por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y con un presupuesto otorgado a través de Concytec de 250 000 soles, la instalación de biodigestores en establos para aprovechamiento de biogás a base de guano de equino en la región de Loreto propuesta por el Grupo Palmas, la producción de biogás utilizando el estiércol de ganado caprino para remplazar el consumo de leña en las cocinas para la mejora de las condiciones de vida de las familias rurales y la conservación del bosque seco ecuatorial de Olmos en la región Lambayeque propuesta por Comité de Gestión de Energía Limpia Senquelito y Cerro Teodoro de Olmos en la Comunidad Campesina Santo Domingo, entre otras (pp. 36 – 39).

De este modo se estarían aprovechando recursos que no hacerlo serian parte del problema. Así mismo, la Dirección General de Competitividad Agraria (DGCA) del Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) suele programar seminarios con el objetivo de mejorar la capacidad de los agricultores de zonas rurales mediante la utilización de residuos agrarios que generalmente son desaprovechados, convirtiéndolos en fuente de energía capaz de ser utilizada

para generar energía eléctrica, calefacción o cocción de alimentos, además de también obtener un eficaz fertilizante, lo cual contribuye a los compromisos y objetivo del país de difundir el uso de RER para la producción de energía y así alcanzar una mayor cobertura de energía eléctrica a nivel nacional, cumpliendo con los objetivos planteados por el estado.

2.2. La actividad agropecuaria en el Perú

Como bien se mencionó anteriormente, esta investigación busca comparar el potencial energético del biogás producido en biodigestores de tipo batch para excretas provenientes de diferentes animales, por lo que la fuente de recursos energéticos renovables (RER) que más interesa en este caso, son aquellos que provienen de la actividad agropecuaria en el país, especialmente los que provienen de la crianza de animales.

De igual modo, la actividad agropecuaria en el país ocupa al 32,5 % de la Población Económicamente Activa (PEA) y territorialmente hablando representa el 30,1 % del total de la superficie del territorio nacional, dividido entre la sierra con 57,5 %, la selva con 31,1 % y la costa con 11,5 % del total (INEI, 2013), destacándose la producción y crianza a nivel de mini fundo o pequeño productor, donde la actividad agropecuaria se desarrolla con fines de supervivencia más que para la obtención de ganancias. Lo cual queda evidenciado en el Censo Agropecuario del año 2012, el cual indica que solo el 0,6 % de los productores agropecuarios son personas jurídicas, en las que destacan las comunidades campesinas, comunidades nativas y sociedades anónimas cerradas, mientras que el 99,4 % restante corresponde a personas naturales, que suelen tener apenas lotes de producción pequeños, en los que se podrían implementar

fácilmente sistemas de aprovechamiento de biomasa y producción de biogás para las necesidades que ellos tengan; cabe resaltar que la mayor parte de estos pequeños productores suelen ubicarse en la sierra del país y se dedican básicamente a la ganadería pues las condiciones climáticas dificultan la actividad agrícola, a diferencia de aquellos productores con mayor capacidad que suelen estar ubicados en la costa y valles interandinos y que combinan ambas actividades (INEI, 2013).

El sector pecuario en el Perú está constituido por una gran diversidad genética de especies entre nativas y adaptadas localmente, entre ellas los bovinos, los camélidos, los equinos, los porcinos, las aves, etc. con gran importancia en el país por la diversidad de funciones que cumplen, entre ellas su contribución a la seguridad alimentaria, la fuerza de trabajo, los recursos que brindan (fertilizantes, RER, fibra para la confección de prendas, etc.), su importancia cultural, entre otras.

La actividad ganadera en la costa, se caracteriza por ser una ganadería de tipo comercial, es decir una crianza intensiva de animales de raza especializada para la producción de leche, carne y lana según sea el caso. Manejando por lo general ganado vacuno, equino, porcino y ovino (INEI, 2013).

A diferencia de lo que ocurre en la costa, en la sierra la crianza de ganado suele realizarse de manera extensiva, ya que la misma extensión de terrenos y la cobertura vegetal de los suelos (pastos) es mucho mayor, lo cual se ve reflejado en los porcentajes de participación por zonas geográficas (costa, sierra y selva). Así mismo, el tipo de ganado que se cría en la sierra difiere del que se cría en la costa básicamente por la raza de estos, ya sea porque las condiciones climáticas son adversas para algunos animales o las condiciones económicas y

tecnológicas de los productores no permiten la crianza de las mismas razas, sin embargo también se crían otro tipo de animales importantes por su participación en la actividad pecuaria en la sierra, como son los camélidos (INEI, 2013).

En el caso de la selva, la actividad tiene lugar principalmente en la parte alta, debido a las adversidades climáticas que representa la crianza de ganado en las zonas bajas (inundaciones), por lo que básicamente se cría ganado vacuno especializado y adaptado a las características específicas del clima tropical y subtropical (INEI, 2013).

2.2.1. Bovinos

La ganadería bovina o crianza de ganado vacuno en el Perú, es un sector importante en la producción agropecuaria. Ya que, de un total de 1'764,000 hogares rurales, aproximadamente 486,000 crían vacunos, para lo cual involucran a una población de 4'500,000 habitantes (INEI, 2013)

El 80 % del ganado bovino se encuentra mayormente en propiedad de pequeños ganaderos y comunidades campesinas donde predomina el vacuno criollo y sus cruces, también conocidos como criollos mejorados, que básicamente permiten una mejor producción lechera. Así mismo, el 20 % restante está dividido entre las razas Holstein, Brown Swiss y Jersey, comúnmente en propiedad de empresas o asociaciones dedicadas a la crianza de ganado con mejores condiciones para estos (INEI, 2013).

Las características que resaltan de la primera de ellas es que es la principal raza de producción lechera, seguida por la Brown Swiss, que tiene la finalidad de producción lechera y cárnica a la vez, además de ser la que mejora adaptada a las condiciones del altiplano esta, mientras que la Jersey es la que mejor aptitud

tiene para zonas cálidas, y su leche contiene ciertas características que favorecen la producción de derivados lácteos. Por último las razas cebuinas, son aquellas que mejor adaptadas a los trópicos están, teniendo una gran capacidad en climas calurosos gracias a su rusticidad, por lo que son la raza elegida para ser criadas en la amazonia (Guitierrez, Trujillo, & Martínez, 2010).

La población bovina a nivel nacional es de 5'571,000 cabezas aproximadamente, las cuales producen alrededor de 1'895,000 toneladas de leche y 387,000 toneladas de carne (Sifuentes , y otros, 2016).

A pesar de ello la producción nacional de carne y leche no satisface la demanda interna del país, y es que lamentablemente el carácter perecible de ambos, la desorganización de los pequeños productores principalmente y la infraestructura de conservación y transporte no lo permite, teniendo que importarse al Perú anualmente aproximadamente 368,000 toneladas de productos lácteos y 2,000 toneladas de carne (INEI, 2013).

En cuanto al consumo per cápita de carne y leche, estos están por debajo de lo recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura con 5.4 y 56.1 kg/hab/año respectivamente; Debido a ello, existe un mercado insatisfecho de 2,000 toneladas de carne y 2'029,000 toneladas de leche, lo que refleja que, a pesar de existir una importante suma de productores ganaderos, estos no dan abasto al mercado nacional, requiriéndose mayor inversión y tecnificación para la producción y comercialización de los productos finales. (INIA, 2017a).

2.2.2. Camélidos sudamericanos

Según el Ministerio de Agricultura y Riego, el grupo de camélidos sudamericanos comprende 4 especies: la alpaca, la llama, la vicuña y el guanaco, siendo las dos primeras especies domesticadas y las dos restantes especies salvajes o silvestres. Todas ellas suelen desarrollarse en alturas entre los 3600 msnm y los 5000 msnm, siendo Perú el principal productor de camélidos sudamericanos del mundo (INEI, 2013).

La población nacional de estos animales asciende a aproximadamente 3'685,5 alpacas (INEI, 2013), 1'189,657 de llamas y 96,670 de vicuñas que habitan en el altiplano peruano, distribuidos principalmente en la sierra sur del país (INIA, 2017b). En el caso de las alpacas, se destaca una mayor población en las regiones de Puno, Cusco y Arequipa, mientras que las llamas destacan una mayor población en Puno, Cusco y Huancavelica.

Reiner y Bryant (1986) y San Martín (1991) mencionan que “la crianza de estos animales, suele ser exclusivamente de tipo extensiva, alimentados con pastos de muy poco valor nutricional, y expuestos a las severas inclemencias ambientales del altiplano andino”, por lo que presentan bajos índices productivos y reproductivos. Sin embargo, existen 2 razas de alpacas criadas, la mayor parte de ellas pertenecen a la raza Huacaya, caracterizada por su vellón, compuesto por finas fibras perpendiculares al cuerpo con presencia de ondulaciones y buena longitud, mientras que las de raza Suri, se destacan por tener fibras más finas rizadas y paralelas al cuerpo.

En cuanto a las llamas se refiere, esta es la especie doméstica de mayor tamaño, llegando a pesar hasta 180 kg. Así mismo, es también el animal más dócil y fácil de pastorear, siendo utilizado en algunos casos como animal de carga. En este caso también existen dos razas o variedades, la Q'ara o pelada y el Ch'aku o Lanuda (INIA, 2017b).

En cuanto al recurso obtenido de estos animales, la fibra producida es de las más apreciadas por la industria textil, compitiendo con la angora, el cashemire y el mohair. Siendo la de mayor calidad aquella procedente de las vicuñas, sin embargo debido a la menor cantidad producida frente a la de alpaca, no resulta tan acogida internacionalmente como la de esta última.

El 85 % de la producción de alpacas proviene de pequeños productores. Los cuales suelen tener parcelas menores a las 20 ha, en donde crían hatos de 50 o menos animales. El 15 % restante se divide en pequeñas y medianas organizaciones campesinas y empresas privadas dedicadas a la crianza de estos animales de forma extensiva o semiestabulada. Teniendo una producción mucho menor que la de los pequeños productores debido a la magnitud.

La crianza de alpacas en el país, tiene una importancia bastante fuerte para la economía de la gente del altiplano, ya que aproximadamente 350,000 familias campesinas dependen de los ingresos económicos generados por la venta de carne y fibras de estos animales, fibra que abastece al 82 % de la demanda mundial de fibra de estos animales (INIA, 2017b).

2.2.3. Equinos

La crianza de caballos en el Perú está dada básicamente por la crianza del caballo de paso peruano, el cual proviene de los caballos introducidos al Perú por los españoles durante la conquista. Esta raza de caballo se caracteriza particularmente por su trote, el cual es llamado “paso llano”, paso lateral o ambladura rota, lo que le permite a este animal tener movimientos suaves y rítmicos en cuatro tiempos. Favoreciendo que el animal tenga un centro de gravedad bajo y prácticamente inmóvil, generando un desplazamiento muy suave que dota al caballo de gran comodidad para su jinete.

La crianza de este caballo tiene lugar en la zona norte del país, principalmente en las regiones de Trujillo, Chiclayo y Piura. Así mismo los fines con los que son criados son básicamente recreativos, ya que de ellos no se produce leche, ni carne ni fibra como en los demás ganados aquí descritos.

A lo largo del año suelen tener lugar algunos concursos relacionados con el caballo de paso peruano con la finalidad de comparar los caballos entre criaderos y corregir y mejorar la reproducción de sus equinos. El concurso más importante, es el concurso nacional organizado por la Asociación Nacional de Criadores y Propietarios de Caballos Peruanos de Paso (ANCPCPP), donde participan criadores de todo el Perú. Este concurso se realiza en Lurín en el local de la ANCPCPP al suroeste del complejo arqueológico de Pachacamac.

2.3. Generación de residuos en la actividad agropecuaria

Según el MINAGRI, los residuos agropecuarios se definen como todos aquellos residuos provenientes de la agricultura, ganadería, avícolas, actividad forestal, y los producidos por industrias alimenticias, tales como mataderos o camales,

entre otros. Siendo generalmente restos de cultivos o de limpiezas de campo y purines o estiércoles del ganado, los mismos que resultan más importantes en la investigación realizada. Que, a su vez, en la mayoría de los casos, son fuente de materia prima para el abonado de tierras o alimentación animal. Sin embargo, los desechos agrícolas y pecuarios, no suelen ser aprovechados y en la mayoría de los casos no reciben una disposición final apropiada tampoco, ocasionando problemas de contaminación tales como la emisión de gases de efecto invernadero, la eutrofización de cuerpos de agua por un exceso de nutrientes (nitrógeno y fósforo), problemas de salud pública, entre otros. Dichos desechos, dependiendo de su composición química y naturaleza podrían alimentar un biodigestor y producir gas metano aprovechable en procesos de generación de energía eléctrica o ser quemados directamente para producir energía calorífica, siendo una fuente importante de energía renovable.

Actualmente existe un reglamento en cuanto al manejo de residuos sólidos del sector agrario, el cual está contenido en el Decreto Supremo N° 016-2012-AG publicado el 14 de noviembre del 2012 por el MINAGRI. En este, el MINAGRI (2012) establece como objetivo principal:

Regular la gestión y manejo de los residuos sólidos generados en el Sector Agrario, en forma sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a los principios de prevención y minimización de riesgos ambientales, así como la protección de la salud y el bienestar de la persona humana, contribuyendo al desarrollo sostenible del país.

2.3.1. Estiércol ganadero

Los estiércoles son el resultado del alimento ingerido y no asimilado o aprovechado por los animales, resultando como desechos del proceso de digestión de los alimentos. Sin embargo, ese desecho aun contiene grandes cantidades de elementos nutritivos capaces de ser aprovechados.

Si bien los excrementos o estiércoles del ganado en general producidos por la misma actividad ganadera son considerados desechos o residuos como tal, que cuando no son manejados adecuadamente constituyen un serio problema para el ambiente, la población humana, y el mismo ganado, estos representan una importante fuente de abono orgánico que contribuye con el mantenimiento de la estructura, la capacidad de retención de agua, la aireación y el desarrollo de microorganismos benéficos en el suelo, así como la disminución de la erosión eólica e hídrica por escorrentía. Por lo que finalmente se consideran un elemento importante y valioso para mejorar la fertilidad del suelo, convirtiéndose en un recurso demandado por las actividades agropecuarias.

La composición de los estiércoles es una variable amplia, ya que depende de muchos factores, entre los que destacan el animal del que provengan, la etapa de crecimiento o edad y alimentación del mismo, la cantidad de agua que beba, entre otros. Sin embargo, en términos generales provee los elementos necesarios para restaurar los niveles de nutrientes en el suelo que sea depositado y mejorar su calidad, siempre y cuando se haga de manera controlada. Cabe resaltar que solo la quinta parte del alimento consumido por el ganado es aprovechada en su desarrollo (incremento de peso, mantenimiento

del mismo y producción), es decir el 20 %, el resto es eliminado a través de la orina y los estiércoles, lo cual constituye la fuente de nutrientes para el suelo que estos contienen. La Tabla 1 muestra en términos generales la composición química de los estiércoles de distintas especies.

Tabla 1: Composición química de los principales estiércoles animales

Componente	Bovino	Camélido	Caprino	Cerdo
pH	8.3	7.9	8.0	7.3
Nitrógeno Total (N) %	1.73	1.5	2.2	1.75
Fósforo Total (P ₂ O ₅) %	1.65	0.85	1.53	2.28
Potasio Total (K ₂ O) %	1.52	1.16	1.06	2.11
Calcio Total (Ca) %	1.41	0.94	1.42	0.8

Fuente: (FAO 1990, citado por (Condori, 2008)

2.3.1.1. Estiércol de bovino

Pérez-Gavilán & Viniegra (sin fecha), mencionan que una vaca promedio produce aproximadamente entre 1 y 4 kg/día de estiércol, sin embargo otros autores señalan valores mucho mayores como es el caso de (DAF, 2018), el cual indica una producción diaria de 27 kg de estiércol, sin embargo estas diferencias se deben básicamente al sistema de crianza, estabulado o pastoreo. Lo cual sumado a la mayor cantidad de cabezas de ganado bovino y al tipo de crianza de estos animales respecto a otros (estabulado), generan que el estiércol vacuno

sea el más común de todos, siendo a su vez el más sencillo de manejar debido a la estabilidad física y química que presentan.

En su estado fresco, suele ser una mezcla de excrementos sólidos con paja y orina de los animales, sin embargo, resulta complicado definir la composición del mismo, ya que esta depende de la especie animal, de la alimentación y la edad del mismo, el manejo de los estiércoles, entre otros. Por lo que puede ser muy variable entre un productor y otro. Sin embargo, en términos generales, el estiércol de vacuno se caracteriza por presentar altos contenidos de humedad cuando está fresco, así como altos contenidos de materia orgánica, minerales y micronutrientes que le confieren cualidades de mejorador suelos, tanto física como químicamente, además es un portador de nutrientes importantes para el crecimiento de plantas como lo son el nitrógeno, el fósforo y el potasio.

Por otro lado los estiércoles están siempre expuestos a pérdidas, las mismas que suelen producirse por el manejo que se les da, ya sean estas pérdidas gaseosas que generan hasta 10 % de detrimentos en nitrógeno, o por lavado, que generan hasta un 20 % de pérdidas en nitrógeno, 5 % del fósforo y hasta más del 35 % del potasio (Iglesias, 1994).

2.3.1.2. Estiércol de camélido sudamericano

En el caso de los camélidos sudamericanos, si bien es cierto la cantidad o volumen de producción es mucho menor al producido por el ganado vacuno, esta es significativa en algunas zonas del altiplano en las cuales existe presencia de familias campesinas dedicadas a la crianza de estos animales, los mismos que son capaces de aprovechar los estiércoles como combustibles para la cocción de alimentos y como fertilizante para sus cultivos.

A diferencia de los estiércoles vacunos, los estiércoles provenientes del ganado camélido presentan menores contenidos de humedad, por lo que su integración al suelo se da con mayor dificultad. Sin embargo, cabe resaltar que, de manera similar al estiércol vacuno y equino, los estiércoles camélidos también presentan un efecto residual de liberación de nutrientes luego del primer año de haber sido aplicados o esparcidos en el suelo (Trinidad, Sin fecha).

Por otro lado, tal como se mostró en la Tabla 1, el contenido de nutrientes es menor al del estiércol bovino, sin dejar de ser un recurso importante para las zonas en donde se crían este tipo de animales.

2.3.1.3. Estiércol de equino

El estiércol de equino por su parte, se caracteriza por ser un excelente fertilizante para suelos arcillosos, y es que al encontrarse comúnmente mezclado con paja y otros restos vegetales, permite mejorar la estructura del suelo, volviéndolo más esponjoso y con mejor aireación para las plantas o cultivos. Así mismo, es rico en celulosa debido al alto contenido de restos vegetales, y al ser pobre en nitrógeno no se corre el riesgo de quemar las plantas, por lo que la dosificación del mismo como abono no resulta tan compleja como con los estiércoles de bovino y camélido (Huachi, 2008).

2.4. Problemas ambientales generados por la actividad agropecuaria

El proceso de intensificación de la ganadería que se desarrolló en las últimas décadas en el país contribuyó no solo al sostenimiento de la actividad ganadera, sino que además generó una mayor eficiencia e incrementos en la producción.

No obstante, el crecimiento y desarrollo de esta actividad también generó un alto impacto sobre el ambiente y en muchos casos problemas de contaminación.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura también conocida como la FAO de la ONU, señala que “a través de la evaluación más completa, profunda y crítica que se ha hecho de la ganadería desde la perspectiva del y para el ambiente, a esta actividad, como la principal fuente de contaminación del suelo y de emisión de nutrientes (N, P y K), materia orgánica, patógenos y residuos de medicamentos a ríos, lagos y zonas costeras en algunos lugares”. Y es que uno de los principales problemas de las explotaciones ganaderas, es el manejo de los desechos generados, mayormente en forma de excretas o purines, el cual comúnmente se ha limitado al lavado de los corrales con grandes cantidades de agua. Así mismo, los animales y sus excretas emiten gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático. Así mismo, la FAO también señala que “conforme se desarrolla la ganadería, esta modela paisajes enteros, reduciendo el hábitat natural con su demanda de tierra para la producción de pastos, forrajes, granos forrajeros y otros insumos agrícolas que intervienen en la alimentación del ganado”, involucrando cambios de uso de tierra y patrones de distribución geográfica. Por lo que los problemas asociados a la producción pecuaria no se llegan a entender del todo sino se incluye al sector agrícola en el análisis (Perez, 2008).

En cuanto al impacto que esta actividad tiene sobre el Cambio Climático (CC) y la contaminación del aire, Perez (2008) señala que “en la publicación realizada por la FAO *“Livestock’s long shadow”*, se reconoce a las actividades ganaderas

como emisoras de cantidades considerables de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que contribuyen de manera significativa al cambio climático”. Cabe mencionar que el proceso digestivo de los rumiantes, y en menor medida, los monogástricos involucra la fermentación de alimentos fibrosos, por lo que constantemente estos animales emiten metano.

Las excretas animales por su parte, son también emisoras de GEI como el metano, los óxidos nitrosos, amoníaco y el dióxido de carbono, sin embargo esto depende de factores que pueden ser manejados, tales como el estado en el que salen de los criaderos, ya sean líquidas o sólidas, la recolección y el almacenamiento que se le da a las mismas y la posible aplicación en la agricultura. Así mismo, Perez (2008) indica que:

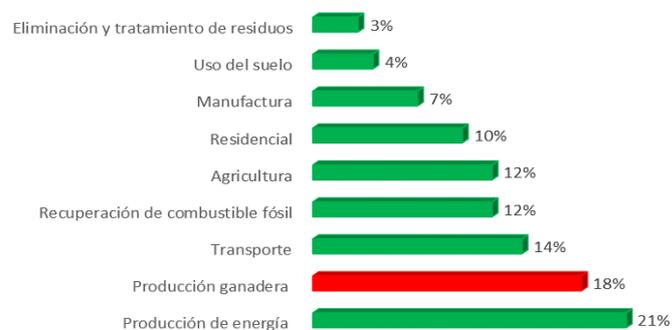
La ganadería también afecta el balance de carbono de la tierra que se usa para alimento animal y contribuye, de forma indirecta, a la liberación de enormes cantidades de carbono a la atmósfera. Lo mismo sucede cuando se clarea el bosque para pastizales. Los combustibles fósiles empleados en los procesos productivos, desde la producción de alimento animal, hasta el mercadeo de productos, también emiten GEI. Muchos de estos efectos indirectos son difíciles de cuantificar. Sin embargo, se estima que las actividades ganaderas contribuyen con 18 % al total de emisiones antropogénicas de GEI de los cinco sectores reportados: energía, industria, residuos, uso del suelo —cambio del uso del suelo— bosques (USCUSB) y agricultura (ver Figura 2). En los dos

últimos sectores la participación de la ganadería es de 50 % y sólo en comparación con la agricultura, la ganadería representa 80 %.

Resultando fundamental hacer hincapié en la magnitud de los problemas que genera no manejar adecuadamente los aspectos ambientales de la actividad.

EL GANADO ES RESPONSABLE DEL

18%



DE LAS EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Figura 2: Contribución de la Ganadería al Total de Emisiones Antropogénicas de GEI.

Fuente: (FAO, 2006)

Perez (2008) sostuvo que el aporte de la actividad ganadera a cada uno de los gases de efecto invernadero más importantes es la siguiente:

Dióxido de carbono (CO_2): al tomar en cuenta la deforestación para el establecimiento de pastos y la degradación de los pastizales, las emisiones de la ganadería constituyen alrededor de 9 % del total global. Sin embargo, las emisiones del sector USCUSB son extremadamente difíciles de cuantificar y los valores de la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) para este sector son poco confiables, por lo que en el reporte de emisiones se omiten con frecuencia, aunque se piensa que su participación es importante. La cadena alimentaria ganadera está siendo más intensiva en el uso de combustibles fósiles y en la medida en que la producción de rumiantes (basada en recursos locales para la alimentación) tienda a sustituirse por la intensiva monogástrica (basada en alimentos transportados a muy largas distancias), habrá un cambio de la energía impulsada por la fotosíntesis a los combustibles fósiles, con el consiguiente incremento en la emisión de CO_2 .

Metano (CH_4): la importancia de la ganadería en la emisión de CH_4 se reconoce de tiempo atrás; la fermentación entérica y las excretas representan 80 % de las emisiones agrícolas de CH_4 y alrededor de 35-40 % del total de CH_4 de origen antropogénico. Con el declive de la producción ganadera de rumiantes y la tendencia general hacia una mayor productividad en este sector, es improbable que la importancia de la fermentación entérica se incremente aún más en el futuro. Pese a ello, las emisiones de CH_4 de las excretas animales, aunque menores en términos absolutos, son considerables y en rápido crecimiento.

Óxido nitroso (N_2O): las actividades ganaderas contribuyen a la emisión de N_2O , el más potente de los tres gases invernadero, con casi dos terceras partes del total global de emisiones antropogénicas de este gas y con 75-80 % de las emisiones agrícolas. El N_2O se genera en el manejo aeróbico de residuos ganaderos.

Amoniaco (NH_3): las emisiones globales a la atmósfera de nitrógeno (N) de origen antropogénico se han estimado recientemente en unos 47 millones de toneladas. Un 94 % es producido por la agricultura, y la ganadería contribuye con 68 % de esta participación, sobre todo por las excretas almacenadas y aplicadas a la agricultura. Se considera que la contaminación resultante (principalmente eutrofización y olores) es más un problema local o regional que global.

Sin embargo, el impacto causado por la actividad ganadera o pecuaria no solo se limita a la emisión de GEI, sino que también afecta otros recursos como el agua. En referencia a este recurso, el documento en cuestión no solo menciona su contaminación, sino que también indica que existe un fuerte detrimento o disminución de la cantidad de esta a lo largo de la cadena productiva, desde la producción de insumos y pastos para la alimentación de los animales, hasta la transformación de estos productos. En el caso de la disminución de las cantidades de agua en la tierra producto de la actividad ganadera, se dice que esta se genera básicamente por la evapotranspiración que tiene lugar en los pastizales y campos de cultivo para consumo animal, en los cuales el riego suele realizarse por gravedad. Y, que si se le atribuye directamente a la ganadería (no

a la agricultura), las cantidades de agua son tan grandes que, en comparación con los demás usos, estos resultan marginales. En el caso de la contaminación de esta, puede producirse de dos maneras, a través de una fuente puntal o una difusa. Entre las fuentes puntuales se identificaron los corrales de engorde, las plantas procesadoras de alimentos, entre otras que descargan directamente sus efluentes a los cuerpos de agua, efluentes que contienen altos niveles de nitrógeno y fósforo, restos de pesticidas y otros nutrientes que principalmente conllevan a la eutrofización de los cuerpos de agua. Mientras que, entre las fuentes difusas, tiene lugar básicamente el riego de áreas agrícolas con aguas residuales, que contaminan el suelo y la napa freática en ciertos casos con exceso de nutrientes, patógenos, residuos de medicamentos y metales pesados (FAO, 2006).

Finalmente, todos estos impactos causados por la ganadería, tienen una repercusión mayor en la pérdida de la biodiversidad del planeta, principalmente en países de América Latina, ya que la ganadería de tipo extensiva es la que mayor participación tiene en el sector, cambiando áreas boscosas por pastizales para la producción de alimento para el ganado, generando una gran pérdida de carbono almacenado en ellas, liberándolo al ambiente y contribuyendo con el calentamiento global.

En el Perú, estos problemas generados por la ganadería están dados básicamente por la forma de crianza de los animales (de tipo extensiva), los cuales son soltados en el campo para que se alimenten libremente, sin control alguno de las excretas que van regando a su paso. Esto genera que la

descomposición de las mismas libere GEI al ambiente, contribuyendo con el calentamiento global del planeta y el consecuente cambio climático. Así mismo, el hecho de que estas sean desperdigadas sin una recolección, genera que estas lleguen a los cuerpos de aguas cercanos, ya sea por lixiviación o escorrentía, pudiendo llegar a eutrofizarlos por exceso de nutrientes. La modificación de paisajes es también uno de los impactos ambientales que esta actividad genera en el país, ya que las cabezas de ganado suelen alimentarse hasta acabar los pastos de un lugar para luego ser llevados a pastar a otro, impidiendo la recuperación de estos, entre otros impactos.

2.4.1. Problemas ambientales generados por el estiércol

La generación de estiércoles en la actividad ganadera constituye uno de los principales impactos que esta actividad genera, y es que, si no existe un adecuado control en el almacenamiento, transporte y aplicación de los mismos, se generan grandes emisiones de GEI, así como la acumulación de nutrientes (macro y micronutrientes) en el suelo y cuerpos de agua superficiales que pueden resultar en daños mayores en los ecosistemas afectados, tal como la eutrofización de un cuerpo de agua o la sobrecarga de nutrientes en un suelo de cultivo. Y es justamente en el control de estas actividades en las que la mayor parte de ganaderos tienen malas prácticas, como es el hecho de depositar directamente en el suelo los estiércoles frescos, los mismos que no son distribuidos ni esparcidos uniformemente en todo el terreno, o no integrarlos al suelo, es decir que únicamente son esparcidos sobre la superficie dejándolos expuestos a la intemperie y a las corrientes de agua generadas por riego o mal

tiempo (lluvias), las mismas que arrastran y acumulan los nutrientes en las zonas más bajas y en cuerpos de agua, ocasionando problemas ambientales.

En el aire los aspectos ambientales generados por el estiércol incluyen al polvo, los malos olores y los gases producto de la digestión aerobia y anaerobia (CH_4 , N_2O , NH_3 , entre otros) que tiene lugar cuando estos no son bien manejados. El polvo por ejemplo se genera en actividades ganaderas desarrolladas en zonas áridas, en las que la vegetación es muy escasa formándose una capa de estiércol que produce grandes nubes de polvo con el movimiento de los animales (Miner *et al.* Citado por Pinos, y otros, 2012). En cuanto a los gases contaminantes emitidos por el estiércol a la atmósfera, se destaca el metano, los óxidos nitrosos y el amoníaco, siendo el primero de ellos el más importante por la contribución del mismo con el calentamiento global.

En el suelo, el principal aspecto ambiental generado por los estiércoles es la cantidad de nutrientes que estos mismos contengan, ya que si bien una cierta cantidad de ellos es beneficiosa, una alta concentración resulta en una sobrecarga, ocasionando infiltraciones por escurrimiento y lixiviación en aguas superficiales y subterráneas, creando desequilibrios en el ecosistema. Así mismo, la acumulación de excretas frescas sobre campos de cultivo pueden causar intoxicación en el ganado que lo consuma debido a la acumulación de nitritos y nitratos sobre estos.

En el caso del agua, como bien se menciona líneas arriba, esta es contaminada directamente por el nitrógeno y fósforo (nutrientes) contenido en los estiércoles

provenientes de la actividad ganadera a través de escurrimientos e infiltraciones en los mismos establos o criaderos, e indirectamente a través de escorrentías y flujos superficiales desde zonas de pastoreo o zonas de cultivo que hubiesen sido abonadas con estiércol fresco (EPA, 2006). Si bien estos nutrientes son beneficiosos para el desarrollo de la vida en general, ya que permiten el crecimiento de algas y plantas acuáticas que sirven de hábitat y alimento para peces y otros organismos acuáticos, en elevadas concentraciones se vuelven perjudiciales, generando un crecimiento excesivo de algas y plantas marinas, las mismas que agotan el oxígeno disuelto en el agua. Produciéndose un proceso de eutrofización por medio del cual el ecosistema se daña, disminuyendo la calidad del agua y llegando a causar la muerte del mismo.

2.4.2. Alternativas de mitigación

Como alternativas de mitigación también propuestas en el documento publicado por la FAO, "*Livestock 's long shadow*", se comenta que el mayor reto para mitigar los impactos ambientales causados por la ganadería está dado por el costo de inversión necesario para implementar las medidas necesarias, y es que son aquellos productores más pobres, que realizan la actividad de manera extensiva, con fines de subsistencia y no de lucro, los que mayor parte de las emisiones generan. No obstante, en él se proponen ciertas actividades que permitirían reducir la emisión de GEI, dentro de ellas y como parte de la reducción del dióxido de carbono (CO₂), se propone reducir la deforestación intensificando la agricultura, la restauración de materia orgánica en suelos, el secuestro de carbono por agroforestería, entre otras.

Para mitigar las de emisiones de gas metano (CH_4) y por ende las más importantes respecto a esta investigación, propone proporcionar a los animales dietas más eficientes para reducir la fermentación entérica, un mejor manejo de las excretas y la producción de biogás (el cual puede ser producido a través de procesos de biodigestión). Finalmente, en cuanto a la reducción de emisiones de N_2O y de NH_3 , se propone mejorar el manejo de excretas y de insumos nitrogenados en la agricultura.

En cuanto a las medidas o alternativas de mitigación para la contaminación y detrimento del agua, se incluyen a grandes rasgos una mayor eficiencia en el uso del agua, del suelo y en el manejo de los residuos, lo cual incluye la colección, el almacenamiento y el procesamiento de los mismos.

Así mismo, diversos especialistas del medio nacional, mencionan como alternativa de mitigación frente a la actividad agropecuaria a la recuperación de áreas degradadas, utilizando solo parte de ellas para la reproducción de pastos que servirían como alimento para el ganado, haciendo uso de la otra parte para la siembra de especies leñosas como frutales o forestales, dando lugar finalmente a sistemas agrosilvopastoriles que permitirían detener la degradación de suelos y deforestación de los bosques, maximizando el potencial del terreno ocupado y las materias primas provenientes del mismo.

Es en este contexto, que esta investigación además de demostrar el potencial y la posibilidad de convertir los residuos agropecuarios en una fuente de energía (biogás) a través de un proceso de digestión anaerobia, busca proponer una solución a los problemas de contaminación generados por los desechos de esta actividad.

2.5. Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia es un proceso microbiológico que ocurre naturalmente en el ambiente, como por ejemplo en el estómago de los rumiantes o en las zonas anóxicas de lagunas y, cuerpos de agua estancados, tales como pantanos, entre otros. Este proceso consiste en la fermentación microbiana de materia orgánica en condiciones anaerobias o ausencia de oxígeno por medio de una variedad de microorganismos anaerobios con la finalidad de descomponerla, convirtiendo el 90 % de la energía disponible por oxidación directa en metano, consumiéndose solo un 10 % en el crecimiento bacteriano, a diferencia del 50 % consumido durante los procesos de digestión aerobia (Varnero, 2011). Este proceso, da lugar a una mezcla de gases conocida como biogás, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono tal como se muestra en la Tabla 2 y a un residuo orgánico en forma de solución acuosa con un alto contenido de nitrógeno, comúnmente utilizado como fertilizante orgánico (Creamer, Chen, Williams, & Cheng , 2010).

Tabla 2: Composición Química del Biogás

Componente	Fórmula	Porcentaje
Metano	CH ₄	40 – 70
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 60
Hidrógeno	H ₂	0.1
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1

Oxígeno	O ₂	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.1

Fuente: (Cepero et al., citado por Severiche, Acevedo, & Jaimes, 2014).

La materia prima utilizada para ser sometida a este tratamiento o proceso, es preferentemente cualquier biomasa residual que posea un alto contenido de humedad, tal como residuos ganaderos (estiércol y purines), lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, restos de comida, residuos agrícolas de poda entre otros. Siendo el principal producto de la digestión anaerobia el biogás, cuya composición porcentual depende básicamente de la materia prima utilizada y del proceso en sí.

Las bondades de este gas son que a pesar de no tener un poder calorífico tan alto como el del gas natural, puede sustituirlo, funcionando como combustible para la generación de electricidad, como fuente de calor o incluso como combustible de vehículos, además de constituir una fuente de energía renovable a diferencia de este último (Acosta & Abreu, 2005).

Para generar un proceso de digestión anaerobia, se utilizan reactores (digestores) cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica. Durante el proceso ocurren una serie de reacciones que permiten la formación de los productos finales antes mencionados (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991). Para ello, existen una serie de microorganismos específicos o especializados que actúan dentro de este proceso. Estos se pueden clasificar principalmente como hidrolíticos,

acidogénicos o fermentativos, acetogénicos, y metanogénicos (Veeken & Hamelers , 1999), respondiendo al nombre de la etapa en la que actúan. Por lo tanto, el proceso de digestión anaerobia consiste en 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis o fermentación, acetogénesis y metanogénesis, tal como se muestra en la Figura 3. Así mismo, es importante resaltar que la hidrólisis resulta una etapa fundamental en cuanto a la producción final de biogás se refiere, ya que de no realizarse de manera correcta, los complejos compuestos orgánicos no serán reducidos y no se podrá realizar la fermentación de toda la materia orgánica disponible, mermando la producción de ácidos orgánicos volátiles y por ende la producción de acetato, dióxido de carbono y nitrógeno, lo que conllevaría finalmente a una producción menor de biogás (Boone, Chynoweth, Mah, Smith, & Wilkie, 1993).

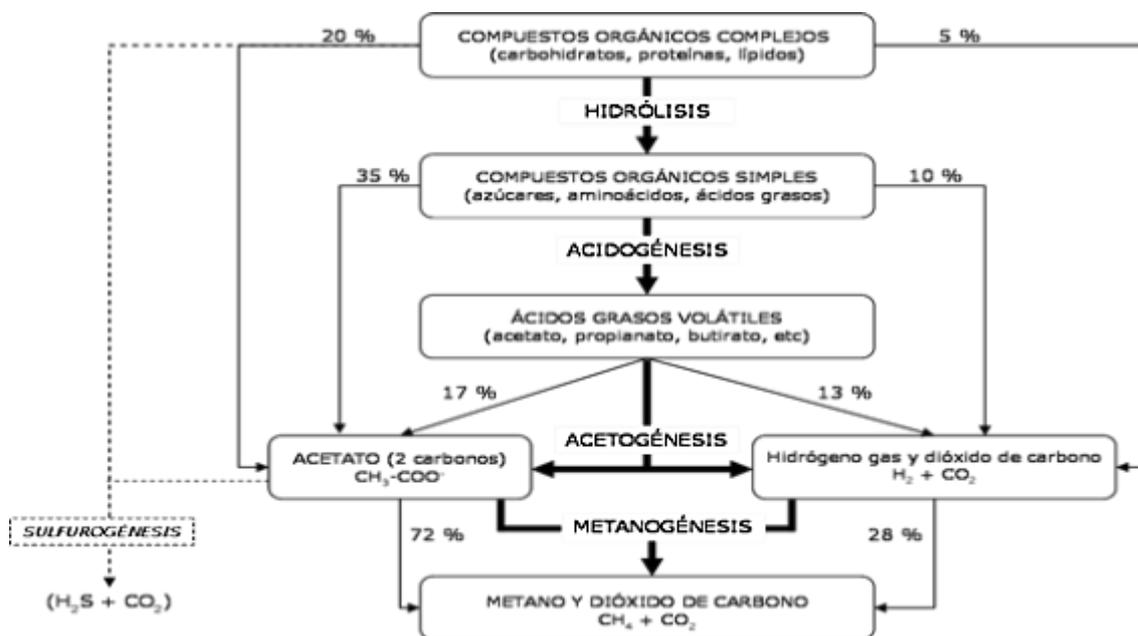


Figura 3: Esquema del Proceso de Digestión Anaerobia

Fuente: (Silvestre, 2015)

Al tratarse de un proceso biológico, este requiere que se asegure una alimentación constante durante el proceso para no alterar el metabolismo de los microorganismos implicados en el. Así mismo, existen ciertos factores determinantes a nivel general en el desarrollo de un adecuado proceso de digestión anaerobia, tales como la naturaleza y la composición bioquímica de la materia prima, la relación carbono/nitrógeno de la misma, la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, los valores de pH y los tóxicos e inhibidores que pudieran estar presentes durante el proceso, entre otros.

El tratamiento de residuos sólidos a través de procesos de digestión anaerobia se ha aplicado con éxito en el tratamiento de residuos agrícolas y pecuarios, desechos de comida, y lodos de aguas residuales debido a su capacidad de producir energía, recuperando aquella que estaría siendo desperdiciada junto con los desechos, y permitiendo realizar un mejor manejo de los residuos, además de evitar problemas de contaminación y emisión de GEI con ello.

Ya establecida como una tecnología confiable, en Europa la digestión anaerobia se utiliza para tratar más 4 millones de toneladas de residuos orgánicos por año, algo que se debe seguir impulsando en todo el mundo para que la sustentabilidad del planeta se vea menos amenazada. (Rapport, Zhang, Jenkins, & Williams, 2008).

2.5.1. Fases de la digestión anaerobia

2.5.1.1. Hidrólisis

La etapa hidrolítica durante la digestión anaerobia resulta fundamental, ya que de ella depende el suministro de sustratos orgánicos para que la misma se siga

realizando adecuadamente. Y es que es en esta etapa en la que los compuestos orgánicos complejos, también conocidos como materia orgánica polimérica por sus grandes cadenas (carbohidratos, proteínas y lípidos), deben hidrolizarse hasta convertirse en compuestos solubles que puedan atravesar la pared celular (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga), de modo que puedan ser utilizados directamente por los microorganismos.

La hidrólisis de estos complejos compuestos a otros más simples, es realizada por la acción de enzimas extracelulares, que a su vez son producidas por los microorganismos hidrolíticos que actúan durante esta fase. Debido a ello la fase hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global de la digestión anaerobia, más aún cuando se trate de residuos con un alto contenido de sólidos. Así mismo, esta etapa depende de la temperatura a la que se lleve a cabo el proceso, que a su vez puede modificar el tiempo de retención hidráulico necesario para completarla, la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, proteínas, carbohidratos y grasas), el tamaño de las partículas, el nivel de pH y la concentración de los productos de la hidrólisis (Varnero, 2011).

Diversos autores, entre ellos Martí (2006), sostienen lo siguiente:

... cualquier sustrato se compone de los siguientes tres tipos básicos de macromoléculas o moléculas orgánicas complejas:

- Proteínas, son fuentes de carbono y energía, por lo cual es un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaerobia pues sus productos tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas por enzimas proteasas en péptidos y aminoácidos, parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis del nuevo material celular y el resto

- son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en las siguientes fases del proceso.
- Lípidos, su degradación en condiciones anaerobias comienza con la ruptura de las grasas por la acción de las enzimas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.
 - Materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, su lenta degradación suele ser la etapa limitante del proceso hidrólisis pues la lignina es muy resistente a la degradación por parte de las bacterias anaeróbicas.

Representando todas estas una materia prima esencial en el proceso de digestión anaerobia, en especial las proteínas y los lípidos, ya que el producto hidrolizado de cada una de ellas servirá de alimentos para las bacterias que intervengan en las demás etapas.

2.5.1.2. Acidogénesis

La segunda etapa de la digestión anaerobia conocida como acidogénesis o fermentación es también definida como una etapa crucial en el proceso, ya que el material orgánico soluble, proveniente de la hidrólisis (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga) es convertida principalmente en ácido acético, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos como alcoholes, ácidos grasos volátiles (ácidos de cadena corta) y ácidos orgánicos por medio de la acción de microorganismos y bacterias fermentativas a través de un proceso de fermentación.

Una de las principales características de esta fase de la digestión anaerobia, es la producción de hidrógeno, esto se debe según Almeida et al (2011) “a que parte de los electrones generados y que no son transferidos a bases de piridinas, son dispuestos vía reducción de protones, formando hidrógeno molecular” (p. 1). Otra de los comportamientos que también caracteriza a esta fase, es la reducción de pH en el reactor, debido a la acumulación de ácidos orgánicos que en ella se da lugar.

Las bacterias anaerobias estrictas y facultativas son aquellas que principalmente llevan a cabo la fermentación de los sustratos hidrolizados (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga). Y tal como menciona (Almeida et al, 2011), “mientras que las bacterias fermentativas son bacterias anaerobias que utilizan en un inicio las rutas catabólicas de polisacáridos (celulosa, hemicelulosa, fructosa, pectina, sacarosa y almidón), aminoácidos y glicerol para producir glucosa, que posteriormente es transformada vía glucólisis o vía Entner-Doudoroff en piruvato, para seguir alguna de las rutas de la fermentación” (p. 1). En esta etapa se dan los siguientes sub-procesos:

Fermentación de carbohidratos solubles, la principal ruta metabólica para degradar glucosa a ácidos orgánicos es la de Embden - Meyerhof, esta fermentación se realiza por diferentes microorganismos. Los Clostridium son los principales microorganismos que convierten la glucosa en butírico, acético, dióxido de carbono e hidrógeno molecular (Carhuancho, 2012, pp. 23 – 24).

Fermentación de aminoácidos, los principales productos de esta sub-etapa son los ácidos grasos de cadena corta, succínico, aminovalérico e hidrógeno molecular, esta fermentación consiste en un

proceso rápido que no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos. Las bacterias que participan en el proceso son Clostridium, Peptococcus y Bacteroides (Carhuacho, 2012, p. 24).

Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga, estos son oxidados a ácidos grasos de cadena corta mediante el mecanismo de β -oxidación, el cual es un ciclo en espiral que va liberando un acetyl-CoA en cada bucle produciendo básicamente ácido acético. Para que ocurra la oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga, es sumamente importante la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrogeno para producir este mecanismo pues en condiciones libres de oxígeno (anaerobias) es termodinámicamente inestable (Carhuacho, 2012, p. 24).

De esta manera se consigue acidificar el medio, dando paso y generando un medio adecuado para el grupo bacteriano interviniente en la siguiente etapa.

2.5.1.3. Acetogénesis

Durante esta fase, tiene lugar la conversión de los ácidos grasos volátiles en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. La conversión de este, tal como nos describen Corrales, Bohórquez, Antolínez, & Corredor (2015) se puede dar de los siguientes dos mecanismos:

La acetogénesis por hidrogenación, en la cual se produce acetato (CH_3COO^-) como producto final de la reducción del dióxido de carbono más hidrogeno y la acetogénesis por deshidrogenación, en donde las bacterias son inhibidas por pocas cantidades de oxígeno y por lo tanto, solo sobreviven aquellas asociaciones que contienen microorganismos

que consumen hidrogeno para su desarrollo como las bacterias homoacetogénicas (fermentación láctica) y bacterias sulfato reductoras (p 66).

En el caso de las bacterias homoacetogénicas, Constanza, Antolinez, Bohórquez & Corredor (2015), indican que:

Estos son microorganismos anaerobios estrictos, los cuales catalizan la formación de acetato a partir de H y CO₂. La reducción del dióxido de carbono en todos los homoacetógenos se produce por la ruta de la acetyl-CoA, esta ruta también es útil para la fijación de carbono por las bacterias sulfato reductoras y la fermentación de homoacetógenos para producir acetato como producto final (p. 66).

En síntesis, la acetogénesis es la conversión de los ácidos orgánicos a acetato, dióxido de carbono y/o nitrógeno e hidrógeno gracias a la actividad de las bacterias acetogénicas presentes; estos compuestos son los sustratos directos para la posterior producción de metano (Gerardi, 2003). A esta altura del proceso, tal como indica Varnero (2011) “la mayor parte de las bacterias anaeróbicas han consumido todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo eliminan productos de desecho, ácidos volátiles sencillos principalmente, los cuales serán utilizados como sustrato por las bacterias metanogénicas en la siguiente etapa” (p. 22).

En cuanto a las bacterias homoacetogénicas en el proceso se encuentran *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii* (Constanza, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015).

2.5.1.4. Metanogénesis

Durante la cuarta y última etapa de la digestión anaerobia, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores (acetato, dióxido de carbono e hidrógeno principalmente). Los microorganismos metanogénicos, considerados como los de mayor importancia dentro del consorcio de microorganismos anaerobios por la función que cumplen durante el proceso, son los responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente, tales como el acetato, el hidrógeno molecular, el dióxido de carbono, el ácido fórmico, el metanol y algunas metilaminas, y de la eliminación del medio de los productos de las anteriores fases.

Durante todo el proceso de la metanogénesis se establecen dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan, los hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y ácido fórmico y los acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Cabe resaltar que tal como menciona Varnero (2011):

Aproximadamente un 70 % del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato para hacerlo (Methanosarcina y Methanothrix). El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. Entre ellos el más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior (p. 22).

2.5.2. Factores que afectan el proceso

Existen diversos factores determinantes en el proceso de digestión anaerobia, que pueden mejorar o inhibir el desarrollo del mismo. Entre los más influyentes encontramos a las características bioquímicas de las materias primas, la relación carbono/nitrógeno de las mismas, los niveles de sólidos totales y sólidos volátiles, la temperatura, el pH y la alcalinidad, el tiempo de retención, la velocidad de carga orgánica, la agitación, entre otros.

2.5.2.1. Naturaleza y composición de la materia prima

Las características bioquímicas que presenten los residuos o materia prima que ingresarán al reactor (biodigestor), deben ser tales que permitan el desarrollo y la actividad microbiana del sistema para que el proceso de digestión anaerobia se realice adecuadamente. Para que ello suceda, el proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Comúnmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos orgánicos presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo, cuando se requiere realizar la digestión de ciertos desechos agroindustriales puede presentarse el caso de requerirse la adición de las sales antes mencionadas (Varnero, 2011).

Por otro lado, las sustancias con alto contenido de lignina (como los restos secos de cosechas o limpieza de campos), no son directamente aprovechables por los microorganismos, por lo que deben ser sometidos a tratamientos previos tales

como el cortado, macerado o compostado, con la finalidad de liberar las sustancias que pueden ser transformadas. En el caso de los estiércoles animales, la degradación de cada uno dependerá del tipo de animal del que provengan y la alimentación que este haya recibido.

En términos generales, la materia prima que puede ser utilizada y tratada bajo un proceso de digestión anaerobia, se clasifica en tres grandes grupos, los residuos de origen agrícola (estiércol de ganado, residuos de alimentación del ganado y residuos de cosecha y cultivos energéticos, entre otros), los residuos de tipo municipal (residuos orgánicos provenientes de hogares privados, residuos de mercado y alimentos vencidos o en mal estado, entre otros) y los residuos industriales (glicerina, residuos del procesamiento de alimentos o grasas provenientes de las trampas para esta, entre otros) (Da costa, 2013). Cabe resaltar que los residuos de las actividades agrícolas e industrias alimentarias, resultan ser bastante buenos para la digestión anaerobia ya que generalmente no contienen contaminantes, patógenos ni metales pesados (Rivas, Faith, & Guillen, 2009).

Sin embargo, existen otras clasificaciones más detalladas como la que presenta Varnero (2011) en el *Manual del Biogás*, publicado por la FAO, donde se clasifican los sustratos o materias primas en las siguientes cuatro clases, “en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO)” (p. 32), tal como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de sustratos para la digestión anaerobia

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características cuantitativas
Sólido	1	Basura doméstica	> 20 % ST
		Estiércol sólido	40 – 70 % Fracción orgánica
		Restos de cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta	2	Heces animales	100- 150 g/l DQO 5 – 10 % ST
Fluidos con alto contenido en sólidos suspendidos	3	Heces animales de cría y levante	3 -17 g/l DQO
		Aguas residuales de mataderos	1 – 2 g/l SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5 – 18 g/l DQO
		Aguas negras	4 – 500 g/l DQO

Fuente: (Varnero, 2011)

Así mismo, este documento detalla que, de acuerdo a sus características, los sustratos de clase 1 pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch o por lotes. Mientras que los demás son degradados de manera eficiente en otro tipo de biodigestor.

2.5.2.2. Relación Carbono/Nitrógeno

En términos generales, toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a un proceso de fermentación anaeróbica. Sin embargo, la cantidad

y calidad de este, dependerá de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. El carbono y el nitrógeno resultan ser las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas encargadas de generar finalmente el metano, responsable a su vez de conferirle las características de combustible al biogás. Siendo el carbono la fuente de energía para las bacterias y el nitrógeno el alimento usado para la formación de nuevas células.

Generalmente, este tipo de bacterias (metanogénicas) consumen alrededor de 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación carbono/nitrógeno debe estar en una proporción de entre 20 y 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno. Es debido a ello que para la preparación del sustrato que ingresa al biodigestor se suele mezclar estiércol de ganado rico en nitrógeno y restos de cosecha como rastrojos de maíz, paja de trigo, arroz, entre otros, con el fin de obtener una mezcla con la proporción adecuada de carbono y nitrógeno.

Cuando la cantidad de carbono supera dicha proporción, la descomposición del material ocurre con mayor lentitud, esto debido a la baja cantidad de nitrógeno en el medio que no permite la multiplicación y el desarrollo de las bacterias metanogénicas, prolongándose el periodo de producción de biogás ya que el proceso, aunque más lento, sigue su curso. Caso contrario, cuando la proporción de nitrógeno respecto al carbono es mayor que la considerada óptima, la producción de biogás disminuye debido a la formación de amonio, el cual es tóxico para las bacterias metanogénicas, inhibiendo la actividad bacteriana y cancelando el proceso de digestión anaerobia cuando la relación disminuye a valores de 8:1 (Varnero, 2011). En ese sentido no suele recomendarse utilizar un solo tipo de sustrato o residuo ya que generalmente no tienen una relación C/N inicial correcta. Por el contrario tal como indica Guevara (1996) citado por

Rivas, Faith, & Guillen (2009), “lo ideal, es combinar materiales con alto contenido de nitrógeno con otros ricos en carbono con la finalidad de obtener un balance de nutrientes ideal que promueva el crecimiento de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica dentro del reactor y, de esta manera aumentar la productividad del mismo” (p. 41).

2.5.2.3. Temperatura

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, dependen fuertemente de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados, que a su vez dependen de la temperatura. Es por ello que este es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación de la materia orgánica y la producción de biogás; conforme esta aumenta, aumenta también la tasa de hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos, la velocidad de crecimiento de los microorganismos y con ello la producción de biogás (Elías et al., 2012 citado por (Díaz de Basurto, 2013).

Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor suelen desestabilizar el proceso. Por lo que resulta importante mantener una temperatura más o menos constante.

Existen tres rangos o regímenes de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo. Psicrófilo que se da por debajo de 25 °C, mesófilo que va entre 25 y 45 °C y termófilo que se desarrolla entre 45 y 65 °C. Siendo el rango termófilo el más eficiente en cuanto a la velocidad de producción

y eliminación de patógenos (ver Tabla 4). Sin embargo, resulta ser también el más inestable ante cualquier cambio en las condiciones de operación, presentando además mayores problemas de inhibición por la toxicidad de algunos elementos a mayores temperaturas, por lo que llevar el proceso en dicho rango requiere un mayor control y seguimiento del proceso, así como un mayor gasto energético. Mientras que, en el rango mesófilo, el proceso se desarrolla de forma más estable, consumiendo menos energía (Fernandez, Pérez, & Romero, 2008).

Tabla 4: Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaerobia

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psychrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: (Varnero, 2011)

“Este parámetro está íntimamente ligado a los tiempos de retención que tendrá la biomasa dentro del biodigestor, y es que mientras mayor sea la temperatura a la cual se desarrolle el proceso, menor será el tiempo necesario para metabolizar una misma cantidad de biomasa” (Hilbert, 2006) (p. 9).

2.5.2.4. PH y alcalinidad

El pH es un parámetro que mide las concentraciones del ion hidrógeno o el ion hidroxilo en el medio evaluado, así mismo también determina la composición del nitrógeno y el amoníaco total. “El amonio y los iones hidrógeno (H+) se suelen encontrar a bajos niveles de pH mientras que el amoníaco y los iones hidroxilo predominan en valores altos de pH” Sung y Liu (2003) citado por Rivera (2010) (p. 9).

La digestión o fermentación anaeróbica de compuestos orgánicos, es un proceso que se ve afectado por los cambios en los valores de pH fuera de los rangos considerados adecuados para cada una de las subetapas o fases del proceso. Sin embargo, existe una comunidad microbiana en particular que resulta ser más susceptible a estos cambios, y es precisamente la comunidad microbiana (bacterias metanogénicas) que se encarga de generar el gas metano que tanto importa a la hora que llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia. De manera general, se establece que los diferentes microorganismos que actúan en este proceso, presentan niveles de actividad óptimos entorno a la neutralidad. Siendo los valores óptimos de pH para los grupos bacterianos acidogénicos entre 5.5 y 6.5, mientras que para la comunidad bacteriana metanogénica, son considerados valores de pH óptimos aquellos entre 6.8 y 7.2. Cuando los cultivos son mixtos, el rango de pH óptimo es considerado aquel que se encuentra entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal (Varnero, 2011).

Según el *Manual de Biogás*, publicado por la FAO en el 2011, una vez estabilizado el medio, para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0 ya que el valor del pH en el digestor no

sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Valores de pH por debajo de 6 resultarán en un biogás pobre en contenido de metano, por lo tanto, sus cualidades energéticas también serán bajas. Ello debido al desequilibrio generado en el sistema, llegando incluso a cesar la producción de metano. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es recomendable mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad.

2.5.2.5. Tiempo de retención hidráulico

Diaz de Basurto (2013) Manifestó lo siguiente: “el tiempo de retención hidráulico es la medida que describe el tiempo promedio que una sustancia reside en el reactor. Al aumentar el tiempo de retención hidráulico, aumenta el grado de degradación de la materia, así como la producción de metano”.

Una característica de este parámetro, es que solo puede ser definido en biodigestores de tipo Batch o flujo discontinuo, como los utilizados para esta investigación, ya que el tiempo de retención hidráulico, coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del biodigestor. Mientras que, en biodigestores de flujo continuo o semicontinuo, el tiempo de retención hidráulico está en función del volumen del biodigestor y el volumen de carga diaria, siendo el resultado de dividir estos últimos.

Por otro lado, el tiempo de retención hidráulico no solo está ligado al tipo de biodigestor que se utiliza, sino que también está fuertemente correlacionado a la temperatura y el tipo de sustrato utilizado. Tal como se mencionó anteriormente, mayores temperaturas implicarán un menor tiempo de retención, mientras en el caso de los sustratos, aquellos que presenten una mayor cantidad de carbono

retenido en moléculas resistentes como la celulosa requerirán mayores tiempos de retención para ser totalmente metabolizados o digeridos.

2.5.2.6. Nutrientes

Para llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia, al igual que en cualquier otro proceso anaeróbico, es necesaria la presencia de macro y micronutrientes que permitan sintetizar nueva biomasa. Siendo los principales nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos el carbono, el nitrógeno y el fósforo, así como otros elementos en cantidades traza como el selenio, el calcio, el potasio, el hierro, el manganeso, el zinc, entre otros. Ya que se ha identificado que estos mejoran la producción de metano (Varnero, 2011).

2.5.2.7. Agitación y mezclado

La agitación y mezclado del sustrato al interior del biodigestor permite la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas y el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana (en caso se trate de un biodigestor de flujo continuo o semicontinuo), ayudando de esta forma a evitar la formación de costras dentro del digestor, uniformizando la densidad bacteriana y evitando la formación de espacios "muertos" sin actividad biológica, lo que previene la formación de espumas y la sedimentación en el reactor (Carhuancho, 2012).

La agitación y mezclado del sustrato permite también mantener un equilibrio simbiótico entre las bacterias que allí se desarrollan, la ruptura de ese equilibrio, que permite que el metabolito de un grupo específico sirva de alimento para el siguiente implicaría una merma en la actividad biológica y por ende una

reducción en la producción de biogás (Hilbert, 2006). En términos generales, la agitación y mezclado del sustrato dentro del reactor permite una mayor producción de biogás, reduciendo el tiempo de retención hidráulica.

2.5.2.8. Inhibidores del proceso

El proceso de digestión anaeróbica es un proceso biológico que requiere de ciertas condiciones químicas, físicas y microbiológicas que le permitan llevarse a cabo de manera correcta, sin embargo, al igual que todo proceso biológico, es susceptible de ser inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema. Ya sea que estas estén formando parte de las materias primas utilizadas para alimentar el biodigestor, o provengan de la actividad metabólica de los microorganismos al interior de este. Sustancias tales como metales pesados, amoníaco, compuestos halogenados, cianuro y fenoles forman parte de las sustancias que pueden ingresar con la materia prima al biodigestor, en tanto que, el amoníaco, el sulfuro, y los ácidos grasos de cadena larga, suelen ser parte de los subproductos tóxicos generados por la actividad metabólica de los microorganismos al interior del biodigestor.

Por otro lado, tal como comenta Varnero (2011) “en algunos casos, la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducida significativamente mediante la aclimatación de la población de microorganismos a este” (p. 46); por lo que se recomienda su práctica para conseguir mejores resultados.

2.5.3. Productos de la digestión anaerobia

2.5.3.1. Biogás

Se denomina biogás a la mezcla de gases que resultan de la descomposición del material orgánico por medio de un proceso digestivo, que tiene lugar gracias a la acción bacteriana en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias). Para ello existen básicamente tres clases de residuos de biomasa o residuos orgánicos que pueden ser utilizados con este fin, el sustrato de origen agrícola como el estiércol de ganado, residuos de alimentación del ganado y residuos de cosecha y cultivos energéticos, los residuos de tipo municipal, como aquellos residuos orgánicos provenientes de hogares privados (recogidos por separado), residuos de mercado y alimentos vencidos o en mal estado y finalmente los residuos industriales, tales como la glicerina, residuos del procesamiento de alimentos o grasas provenientes de las trampas de esta. Para que todo esto suceda y, la sustancia orgánica de estos residuos pueda convertirse en biogás, estos deben atravesar un proceso de digestión, para ello se utilizan digestores herméticos que permiten de cierto modo mantener controlado el proceso (Da costa, 2013).

2.5.3.1.1. Características Químicas

Tal como se mencionó anteriormente, este gas combustible (biogás) está compuesto por varios gases, entre los que destacan básicamente el metano y el dióxido de carbono.

Como con el gas natural, el componente principal del biogás que determina el contenido de energía del mismo y le brinda las características de combustible, es el metano. Por lo que su valor o calidad energética estará dada en función del

contenido o concentración de este compuesto (CH_4), variando así en función de las condiciones en las que haya sido realizado el proceso y como hayan sido manejados los factores determinantes (materia prima, temperatura, pH, nutrientes, entre otros) (Kapdi et al. 2004 citado por Moscoso, 2010).

La composición química o proporción en la que están distribuidos los diferentes gases en este combustible renovable o verde con el ambiente es tal como se mostró en la Tabla 2. Metano entre el 40 y 70 %, dióxido de carbono entre 30 y 60 % y cantidades menores al 1 % de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) y vapor de agua.

2.5.3.1.2. Características Físicas

Entre las propiedades físicas más notorias del biogás se encuentra su capacidad de quemarse casi sin olores y con llama azul, sin embargo, su valor calorífico es menor al del gas natural y otros gases como el propano o el metano propiamente, por lo que 1 m^3 de biogás equivale a aproximadamente $0,61 \text{ m}^3$ de gas natural (Sosa, Chao, & Del Río, 1999).

Por otro lado, el biogás se destaca por su amplia variedad de usos o versatilidad, y es que este compuesto puede ser utilizado para la producción de energía calorífica que a su vez es utilizada para brindar calefacción a hogares rurales o cocinar en ellos, generación de energía eléctrica a través de motores de combustión interna, e incluso como combustible de vehículos adaptados para funcionar con gas natural. Sin embargo, al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable, por lo que existen diversos beneficios derivados del proceso de conversión de residuos orgánicos en biogás, entre los que resalta la capacidad de aprovechamiento del potencial energético

y el adecuado manejo de estos residuos con la consecuente mejora de la calidad ambiental que ello conlleva.

2.5.3.1.3. Potencial energético del biogás generado por excretas animales

(Sogari, 2003), menciona que uno de los parámetros que permite medir o cuantificar el potencial energético del biogás generado a partir de la fermentación de materia orgánica y quizás el más importante de ellos, es la productividad de metano, también conocida como productividad metanoica. Que se define como la cantidad de metano generado en un tiempo determinado respecto a la materia prima utilizada en el biodigestor, ya que es este gas el responsable de conferirle las características de combustible al propio biogás.

Por otro lado, (Besel, 2007) menciona que un biogás con un contenido de 60 % de metano presenta un poder calorífico de aproximadamente 5500 kcal/Nm³. Siendo comparable a 0.8 l de gasolina, 0.6 m³ de gas natural, 0.3 kg de carbón y 6.8 kWh de electricidad, por lo que también es considerado un combustible importante.

En el caso del excremento o estiércol de vaca, diversos estudios, señalan una producción máxima de metano de alrededor del 70 % del biogás producido, mientras que en promedio la producción de metano se sitúa entre 40 y 70 % (Espinal, Olvera, Hernandez, & Morillón, 2016) (García, 2018). Por otro lado, el estiércol proveniente del ganado equino, tiene potencial para generar alrededor de 30 y 50 % metano en el biogás producido (Mönch-Tegeder, 2013). Mientras

que el estiércol de llama es capaz de generar alrededor 40 y 60 % de metano en el biogás producido (Alvarez, Villca, & Lidén, 2005).

2.5.3.2. Bioabono

El efluente o bioabono extraído del biodigestor es un abono orgánico originado a partir de la descomposición de materiales orgánicos, como estiércoles animales, plantas, restos de cosecha y poda, entre otros, en ausencia de oxígeno. Es decir, es la mezcla del sustrato procesado y estabilizado y la biomasa microbiana producida durante la digestión anaerobia (Martí, 2006). Así mismo, resulta ser un fertilizante muy rentable ecológica y económicamente, ya que promueve la absorción de nutrientes y el desarrollo en las plantas y soluciona el problema de la gestión de residuos sólidos agropecuarios en los espacios ganaderos y campos de cultivo.

El bioabono presenta una fase sólida y una líquida, conocidas como biosol y biol respectivamente. Del cual aproximadamente el 10 % corresponde al primero y el 90 % al segundo de ellos (Aparcana & Jansen, Estudio sobre el valor fertilizante de los Productos del Proceso "Fermentación Anaeróbica" para Producción de Biogas, 2008). Presentando ambos, excelentes cualidades agronómicas para los cultivos, ya que como se menciona anteriormente, promueven la absorción de nutrientes, el crecimiento de las raíces, tallos y frutos, entre otros beneficios asociados.

2.5.3.2.1. Biosol

El biosol o bioabono sólido, es el resultado de separar el fango resultante de la digestión anaeróbica dentro del biodigestor de la parte líquida. Este es un fango estabilizado rico en nutrientes, siendo más rico en nitrógeno y fósforo que el procedente de un compostaje tradicional (Álvarez, 2004). Así mismo, es también un abono orgánico reconstituyente y directamente asimilable por las raíces de las plantas, rico en enzimas, microorganismos benéficos, fitohormonas y otros componentes útiles para ellas. Por lo cual se emplea como estimulante del crecimiento radicular y parte aérea de la planta, confiriéndole efectos hormonales, ya que permite elevar el índice de área foliar y el peso foliar específico, así como la tasa y la eficiencia fotosintética de la planta, favoreciendo la biofertilidad y la sanidad del suelo (Pinto & Vargas, 2008).

La aplicación de este bioabono, se suele realizar de la misma manera en que se emplea el compost, sin embargo, se obtienen mejores resultados que con este último debido a la mayor concentración de nutrientes que el biosol contiene.

2.5.3.2.2. Biol

A diferencia del biosol, el biol es la fracción líquida resultante del proceso de digestión anaerobia, y es obtenido luego de decantar el fango proveniente del biodigestor o reactor en el que se haya llevado a cabo el proceso. Cabe resaltar que aproximadamente el 90 % del material con que se carga el biodigestor se transforma en biol, y si bien las características de este bioabono varían en función del material digerido, presenta en términos generales un alto contenido de materia orgánica (20-40 %), con una baja presencia de materia seca (de 1 a 5 %) y en el peor de los casos una cantidad de nutrientes igual a la del material utilizado para la fermentación, promoviendo de todas formas la disponibilidad de

los mismos para las plantas, como es el caso del nitrógeno amoniacal (Aparcana Robles & Jansen, 2008).

Así mismo, el biol es un importante abono orgánico para suelos desgastados o pobres en estructura y nutrientes, ya que, al ser un producto activo biológicamente, desarrolla fermentos nitrosos y nítricos, así como microflora, hongos y levaduras que son un excelente complemento para estos suelos improductivos. Adicionalmente, el alto contenido de materia orgánica que este bioabono contiene, ayuda en la estructuración de los suelos, e influye en los procesos químicos, físicos y biológicos del sistema. Resultando fundamental en la génesis y evolución de nuevos suelos con mayor capacidad de producción (entre 30 y 50 % más) y más saludables (Manual del Biol, 2017).

2.5.4. Biodigestor

Un biodigestor consiste básicamente en un contenedor cerrado herméticamente que permite generar un ambiente adecuado, para que, por medio de la acción de bacterias anaeróbicas, la materia orgánica disuelta en un medio acuoso se descomponga o degrade hasta producir un gas compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y trazas de hidrógeno y sulfhídrico, mejor conocido como biogás. Así como también un sustrato rico en nitrógeno comúnmente utilizado como fertilizante orgánico y conocido como bioabono (biol y biosol). Estas bacterias anaeróbicas proceden principalmente de estiércol fresco y se desarrollan al interior del biodigestor, llevando a cabo el proceso de digestión anaerobia explicado anteriormente.

En cuanto a la composición del biodigestor como tal, este está compuesto básicamente de una entrada por donde se introduce la mezcla del estiércol con

agua o sustrato, un contenedor o reactor donde se coloca el estiércol mezclado previamente y donde tendrá lugar el proceso, una salida que va conectada al biodigestor por donde se colecta el bioabono producido, la salida del biogás, ubicada en la parte superior y finalmente otro depósito que contiene el biogás generado. Es recomendable también la instalación de una válvula de seguridad, que evite problemas por sobre presión del gas (MINAGRI, 2016).

Los digestores se pueden construir enterrados o sobre el suelo, pudiendo ser de diferentes materiales como polietileno de alta densidad, ladrillos, cemento, cilindros plásticos, entre otros.

Las características generales que un biodigestor debe considerar mínimamente para que opere de manera correcta, son las siguientes: debe ser hermético para evitar el ingreso de aire que interferiría con la digestión anaerobia y a la vez, impedir las fugas del biogás producido, contar con un agitador o algún otro medio que permita romper las natas y costras que se forman en la parte superior del mismo y contar con medios para efectuar la carga y descarga del mismo.

Por otro lado, existen diversos tipos de biodigestores, todos ampliamente utilizados para llevar a cabo procesos de biodigestión anaerobia. Estos varían básicamente según los parámetros críticos de operación y de diseño de los reactores, parámetros tales como la continuidad de carga y producción (discontinua frente a continua), la temperatura de funcionamiento (psicrófilos, mesófilos y termófilos) y el contenido de sólidos (digestión anaerobia de sólidos frente a líquidos) (Rapport, Zhang, Jenkins, & Williams, 2008). Aunque esto

último no suele verse en el ámbito rural debido las complejidades que represente llevar a cabo un proceso de digestión anaerobia de sólidos.

Los tipos de biodigestores utilizados en el ámbito rural varían ampliamente de acuerdo a su complejidad y utilización. Comúnmente, se clasifican de acuerdo a la continuidad de carga y producción, siendo los más sencillos aquellos clasificados como digestores discontinuos o de tipo Batch. Mientras que los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación.

2.5.4.1. Biodigestor Batch

También conocidos como digestor de flujo discontinuo, de régimen estacionario o de carga por lotes. Se caracterizan por que la carga de estos se realiza una sola vez mientras dure el proceso, descargando todo el biodigestor una vez finalizado para repetir el procedimiento nuevamente. Este tipo de biodigestor a nivel rural puede construirse de varias maneras. Sin embargo, consiste básicamente en un reactor principal en el cual se llevará a cabo el proceso, y un gasómetro generalmente aéreo, que permitirá colectar el biogás producido (ver Figura 4).

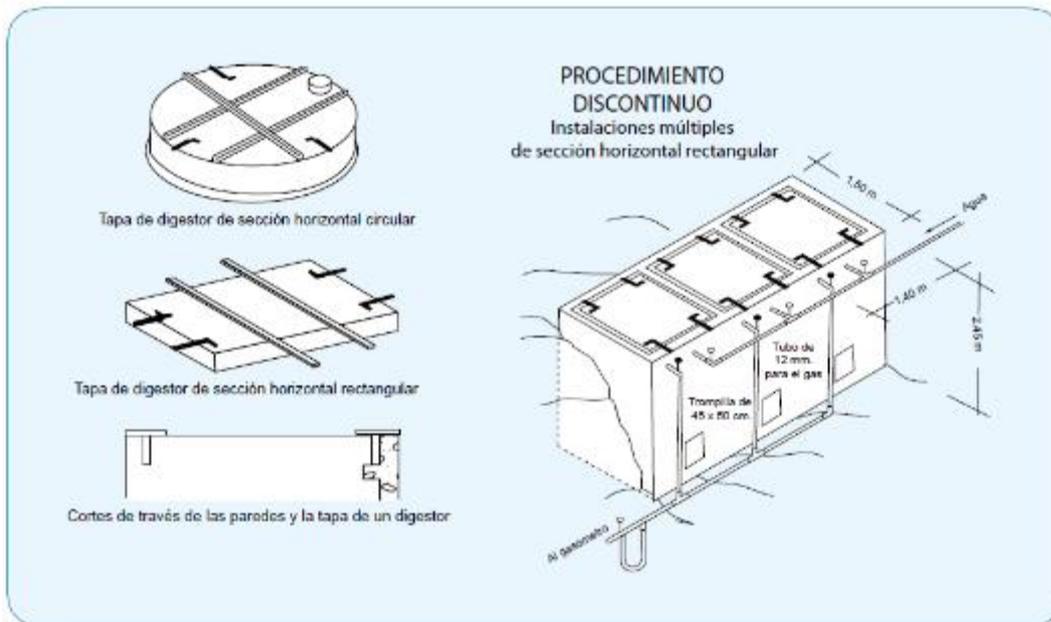


Figura 4: Biodigestor de tipo Batch

Fuente: (Varnero, 2011)

Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. Así mismo, es también ideal a nivel de laboratorio o pruebas piloto si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellos siendo especialmente “eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida” (Hilbert, 2006, p. 15).

En cuanto al rendimiento volumétrico de los biodigestores de tipo Batch, este generalmente es superior al de cualquier biodigestor de tipo continuo, debido principalmente a la mayor cantidad de sólidos que se pueden tratar en estos, de igual forma que el rendimiento de abonos sólidos.

Entre las ventajas que representa utilizar este modelo de biodigestor, además del mayor rendimiento volumétrico en cuanto a producción de biogás se refiere, también ocupa un 70 % menos agua que los digestores continuos y semicontinuos, no forma costras ni necesita agitación y mezclado tan frecuentemente, es más tolerante a los cambios de temperatura en el ambiente, ocupa menos mano de obra debido a la facilidad que representa su utilización y la mayor parte de bioabono se obtiene de forma sólida (biosol), por lo que su aplicación como abono orgánico para suelos resulta más sencilla, entre algunas más que definieron el uso de este tipo de biodigestor en la presente investigación.

III. METODOLOGÍA Y MATERIALES

3.1. Descripción de la zona de estudio

La unidad zootécnica y el centro del caballo peruano de paso de la UCSUR están ubicados a la altura del km. 19 de la antigua panamericana sur en el distrito de Villa el Salvador, provincia de Lima. Formando parte del mismo campus universitario de la Universidad, el cual colinda a su vez con el Refugio de Vida Silvestre Pantanos de Villa.

Las condiciones climáticas de la zona de estudio varían en función de la estacionalidad, presentando temperaturas promedio de entre 21 y 29 °C en verano (enero a marzo), estación durante la cual se llevó a cabo el proceso de digestión anaerobia de esta investigación, 17 y 27 °C en otoño (abril a junio), 15 y 19 °C en invierno (julio a setiembre) y 16 a 24 °C en primavera (octubre a diciembre).

Al momento de la investigación, la población de animales con la que contaba la Unidad Zootécnica de la UCSUR consistía en 2 bovinos y 6 camélidos, además de varios caprinos, mientras que el Centro del Caballo Peruano de Paso, contaba con 11 equinos, una cantidad reducida en ambos casos debido a los fines educativos y de investigación con los que ambos funcionan, además del fin recreacional con el que también funciona el Centro del Caballo Peruano de Paso.

3.2. Diseño experimental

El diseño experimental de esta investigación, en la que se busca establecer o comparar la influencia de estiércoles provenientes de distintos animales en

relación al contenido de metano en el biogás producido por digestión anaerobia en biodigestores de tipo batch, consistió en un diseño completamente al azar (DCA), en el que se evaluaron tres tratamientos por triplicado, es decir con tres repeticiones cada uno. Los mismos que fueron definidos según la proveniencia de las excretas utilizadas, siendo el tratamiento uno (T1) aquel en el que se utilizó excretas de ganado vacuno, el tratamiento dos (T2) aquel en el que se utilizó excretas de ganado camélido y el tratamiento tres (T3) aquel en el que se utilizó excretas de ganado equino.

3.3. Estiércoles de la unidad zotécnica y el centro del caballo peruano de paso de la UCSUR

3.3.1. Selección de los estiércoles en base al origen animal

Las muestras de estiércol se colectaron en la Unidad Zootécnica y el Centro del Caballo Peruano de Paso de la UCSUR, seleccionando aquellos estiércoles provenientes de la crianza de ganado vacuno, camélido y equino. Se registró además información acerca del tipo de alimentación que los animales recibían, su especie y el manejo que se tenía de sus excretas.

Respecto a la crianza del ganado en general (bovino, camélido, equino y caprino), esta se realiza de manera estabulada variando el tipo de alimentación en función del tipo de ganado, siendo concentrado de vacas lecheras, maíz, alfalfa, entre otros el alimento del ganado bovino, concentrado para camélidos, forraje, entre otros el alimento del ganado camélido y concentrado para caballo, heno de alfalfa y paletizado, entre otros el alimento del ganado equino, únicos animales con relevancia para la presente investigación.

El manejo y recolección de los estiércoles no representa un problema ya que, al criar al ganado de manera establecida, prácticamente el 100 % de estos es recolectado, acumulándose en distintos puntos según la procedencia de los mismos. Para finalmente ser utilizado como abono orgánico en las áreas verdes de la UCSUR y fines educativos o de investigación como el presente.

Los tres tratamientos utilizados en la investigación quedaron definidos por la procedencia u origen animal de los estiércoles, siendo los de ganado vacuno, camélido y equino aquellos utilizados.

Para la toma de muestras de estiércol se buscó que estas fueran lo más frescas posibles, por lo que la colección de las mismas se realizó en el propio corral en donde se encontraban los animales. Tomándose aproximadamente 1 kg de estiércol fresco de cada tipo de animal. El cual fue colocado en diferentes bolsas ziploc etiquetadas y transportadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Los materiales usados para la recolección de las muestras que posteriormente serían analizadas para conocer su relación C/N fueron 12 bolsas ziploc de 1 kg de capacidad cada una, guantes de jebes, mascarillas protectoras, etiquetas y un marcador.

3.3.2. Caracterización

Las muestras recolectadas fueron llevadas al LASPAF de la UNALM para realizar el análisis del contenido total de carbono y nitrógeno y así conocer la relación inicial de estos elementos según la procedencia animal de las excretas (ver Anexo 1).

La recolección de las mismas, se realizó de acuerdo a lo recomendado por (SENASA, 2006) con la diferencia que estas no fueron tomadas directamente del recto del animal, sino que fueron recogidas apenas se depositaron en el suelo, colocándose en bolsas herméticas para evitar la exposición de las mismas al medio ambiente durante un largo periodo. Así mismo, se tomaron tres muestras de cada procedencia animal, las cuales fueron mezcladas y homogeneizadas antes de ser enviadas al LASPAF.

3.4. Construcción de los biodigestores tipo batch

Como parte de la presente investigación, se decidió utilizar biodigestores de tipo batch debido a las ventajas antes expuestas, entre las cuales destacan el menor volumen de biodigestor requerido, el hecho de no formar costras ni necesitar agitación diaria, aunque en lo posible se realizó, el no sufrir cambios violentos de temperatura que pudieran perjudicar el desarrollo del proceso y la facilidad de instalación en el espacio brindado por la UCSUR para realizar la investigación.

Debido a la existencia de los tres tratamientos dados por el origen de los estiércoles (ganado vacuno, camélido y equino), se construyeron nueve biodigestores con reactores (contenedores o cilindros plásticos) de 60 L de

capacidad operacional cada uno. Reactores que fueron sellados herméticamente con la finalidad de evitar fugas y pérdidas de gas.

Normalmente estos biodigestores se construyen con tanques herméticos y cuentan con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante o suspendido, donde se almacena el biogás producido durante el proceso. Sin embargo, para el caso de esta experimentación el almacenamiento del gas no fue necesario pues el objetivo principal era evaluar la calidad de biogás producido, dada en función del contenido de metano que este tuviera. Cabe resaltar que el modelo construido fue utilizado previamente con éxito en la Universidad Nacional Agraria La Molina, como en el caso de la investigación realizada por (Carhuancho, 2012).

3.4.1. Materiales

El sistema de digestión de las muestras se diseñó y construyó para un volumen de operación de 60 Litros de capacidad, por lo tanto, los materiales empleados para la construcción de este resultan de pequeña escala. Dichos materiales se listan en el Tabla 5.

Tabla 5: Materiales y equipos utilizados en la construcción de los biodigestores

Materiales	Unidades
Llave de paso de ½" c/r	9
Llave de paso de 1" c/r	9
Contratuerca de bronce ½"	18
Arandelas de bronce 1"	36

Empaquetaduras plásticas	54
Tubo de PVC de ½"	2 ½
Tubo de PVC de 1"	1
Niple en T de PVC de ½"	9
Codo de PVC de ½"	18
Tapones de PVC de ½" c/r	27
Teflón	6
Formador de empaquetaduras	3
Retazos de cámara de llanta	9

3.4.2. Procedimiento para la construcción

El proceso de construcción de los biodigestores utilizados tomó aproximadamente dos semanas, procurando mantener la calidad de armado en cada uno de ellos, utilizando como modelo los biodigestores construidos por Carhuancho (2012) y Biodigestor: Alternativa Energética (2018). Para ello se realizaron los siguientes pasos:

- Se tomaron los cilindros plásticos de 60l utilizados como reactores, haciéndoles dos orificios en la parte superior o tapa del mismo. Uno de ellos echo en la parte central por donde se colocaría el agitador y el otro de ellos más al extremo de la tapa por donde se conectaría la llave de salida del biogás.
- Se realizaron dos orificios más a un costado de los cilindros utilizados como reactores, uno de ellos a media altura, en donde se colocaría el termómetro y el otro de ellos en el tercio inferior, en donde se colocaría la llave de salida del efluente para realizar las mediciones de pH.

- Luego de tener los orificios hechos, se procedió a colocar las contratueras y arandelas de bronce con rosca y empaquetaduras que permitirían la instalación de las llaves de salida de biogás y efluente, y el agitador, utilizando siempre formador de empaquetaduras para asegurar que no existan fugas posteriores en el sistema.
- Para la instalación de los termómetros, se utilizó un tapón perforado colocado de adentro hacia afuera, permitiendo que la presión ejercida al interior del biodigestor solo presione aún más el tapón, impidiendo la fuga del sustrato metabolizado al interior de este.
- Se diseñaron e instalaron los agitadores de acuerdo al espacio que se tenía al interior del biodigestor, estos consistían en un tubo de PVC principal unido a un niple en forma de T conectado a dos tubos pequeños que formaban una especie de paleta.
- Por último, se instalaron las llaves de paso de biogás y líquido, siempre haciendo uso del formador de empaquetaduras y teflón para evitar fugas, así mismo se colocaron los termómetros a través de los tapones perforados y los agitadores fueron colocados en su lugar.
- Finalmente, los biodigestores fueron colocados en el lugar donde desarrollarían el proceso de digestión anaerobia y fueron sometidos a una prueba hidráulica, con la finalidad de asegurar que no existan fugas que interfieran con el proceso que se llevaría a cabo.

En la Figura 5 se observan los biodigestores armados y colocados en su lugar de trabajo, esperando ser sometidos a la prueba hidráulica.



Figura 5: Biodigestores tipo Batch utilizados

En la Figura 6, se muestra el esquema utilizado para la construcción de los mismos.

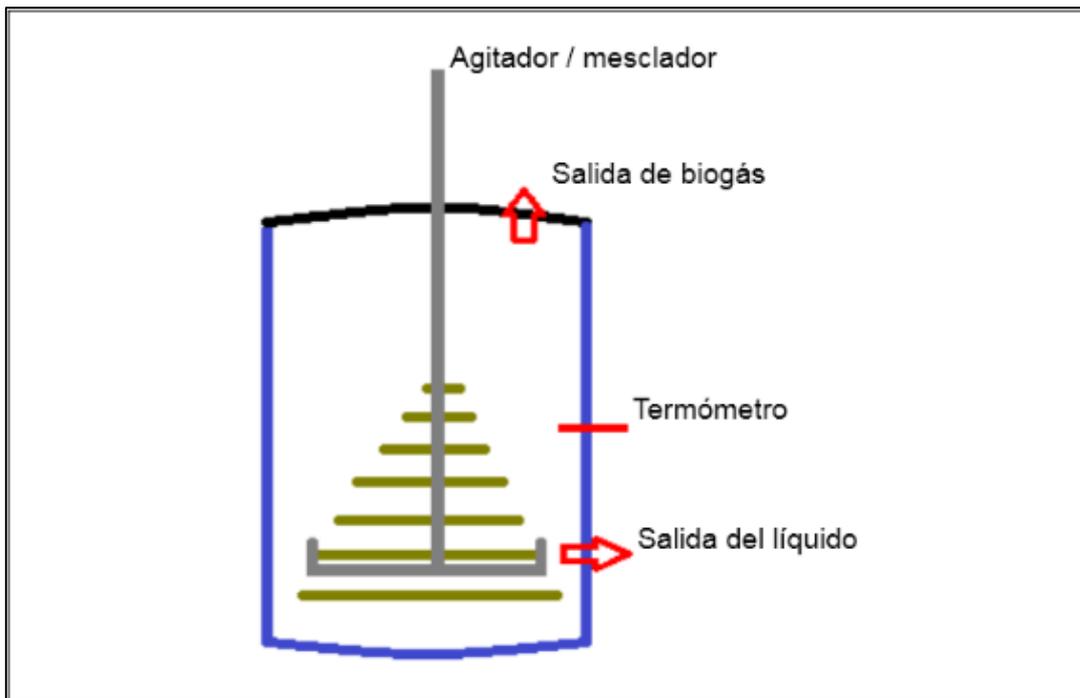


Figura 6: Esquema del biodigestor tipo Batch construido

3.5. Variables operacionales

Las variables operacionales consideradas para el proceso de digestión anaerobia fueron medidas en dos momentos, antes de iniciar el proceso (estiércol fresco) y durante el proceso. Las variables operacionales medidas antes de iniciar fueron el contenido total de carbono, el contenido total de nitrógeno y la relación carbono nitrógeno de los estiércoles. Durante el proceso se monitoreó la temperatura, el pH y la concentración de metano en el biogás, tal como se muestra en el Tabla 6.

Tabla 6: Variables operacionales monitoreadas antes y durante el proceso de digestión anaerobia

	Muestras de estiércol fresco	Durante la digestión anaerobia
Variables operacionales	Carbono total según proveniencia del estiércol	Temperatura de cada tratamiento
	Nitrógeno total según proveniencia del estiércol	pH de cada tratamiento
	Relación C/N según proveniencia del estiércol	Concentración de metano (% CH ₄) presente en el biogás producido por cada tratamiento

3.5.1. Reactivos y equipos

En cuanto a los insumos, reactivos, materiales y equipos empleados para la preparación de soluciones, calibración de equipos y medición de las muestras, estos fueron los siguientes:

- Soda cáustica
- Agua destilada
- Fenolftaleína
- Materiales de vidrio, plástico y metálicos
- Balanza analítica
- Parrilla eléctrica con agitador magnético
- Termómetro digital
- Potenciómetro Hanna HI98127 pH/Temperature Tester.

3.5.2. Medición de las variables operacionales

3.5.2.1. Medición del C total, N total y relación C/N

(Varnero, 2011) en la publicación *“El manual del biogás”* sostuvo que prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a procesos fermentación anaeróbica. Sin embargo, la calidad y cantidad del mismo depende de algunos factores, entre los más importantes la relación C/N, la cual se recomienda este en una proporción de 30/1, considerándose aceptable las que estén en el rango hasta de 20:1.

Como se mencionó anteriormente, los análisis de composición química de las excretas recolectadas fueron realizados en el LASPAF de UNALM, permitiendo conocer la cantidad de carbono total (Ctotal) y nitrógeno total (Ntotal). Valores que a su vez permitieron calcular la relación C/N real de cada estiércol mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Relación (C/N)} = \frac{\text{Ctotal de la muestra}}{\text{Ntotal de la muestra}} \quad \dots (1)$$

Obteniendo valores por debajo de la relación considerada óptima para el proceso de digestión anaerobia de 30/1 en los tres casos, por lo que fue necesario elevar dicho valor agregando rastrojos de maíz según la siguiente ecuación:

$$\text{C/N} = \frac{\text{C1.X1} + \text{C2.X2}}{\text{N1.X1} + \text{N2.X2}} \quad \dots (2)$$

Donde:

C1= % carbono seco de chala de maíz

N1= % nitrógeno seco de chala de maíz

X1= peso chala de maíz seco (kg)

C2= % carbono seco del estiércol

N2= % nitrógeno seco del estiércol

X2= peso de estiércol seco (kg)

C/N= Relación C/N (30/1)

De esta manera la relación C/N de los sustratos utilizados se elevó hasta el valor óptimo de 30/1 para su posterior carga en el biodigestor. Cabe mencionar que la chala fue picada previamente.

3.5.2.2. Medición de la temperatura

La medición de temperatura se realizó en la fase líquida, a través de los termómetros digitales insertados en los biodigestores, tal como se muestra en la Figura 6 (esquema de construcción del biodigestor). Los cuales permitieron el monitoreo directo de este parámetro en el momento deseado y con facilidad de lectura.

3.5.2.3. Medición del pH

La medición del pH se realizó mediante la utilización de un potenciómetro Hanna HI98127 pHep 4 pH/Temperature Tester, el cual era introducido directamente en la muestra hasta tener una lectura estable del mismo.

Inicialmente, mientras la muestra obtenida del biodigestor presentaba sólidos en suspensión de tamaño considerable, la muestra se diluía en una solución con

agua destilada en proporción 1/5 (5 partes de agua destilada por 1 de muestra), siendo agitada durante 15 minutos antes de obtener la lectura del equipo, tal como indica la norma técnica de medición de pH para compost TMECC 4.11-A (USDA, 2001). Posteriormente, cuando el efluente obtenido del biodigestor dejaba notar menor cantidad de sólidos suspendidos y una mayor degradación de los mismos, la lectura se realizó de manera directa.

3.5.2.4. Medición del porcentaje de metano en el biogás

La medición del porcentaje de metano en el biogás se realizó mediante un sistema de desplazamiento de líquido, el cual funciona de manera similar al conocido como la “botella de Mariotte”. Este método consiste en tomar 100 mL de la muestra (biogás) en una jeringa grande (100 mL) e impulsarla lentamente a través del sistema de desplazamiento de líquido, el cual a su vez consiste en un recipiente o frasco de suero (para el caso de esta investigación) con una solución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH) en un rango de 15 – 20 g/L coloreada con fenolftaleína como indicador de saturación.

De esta manera, a medida que el biogás pase a través de esta solución alcalina de alto pH, el dióxido de carbono (CO_2) contenido en este reacciona convirtiéndose en carbonato, quedando absorbido en el líquido y dejando pasar únicamente al gas metano (CH_4) a través de la solución, el cual desplaza un volumen de solución equivalente a este fuera de la botella.

El volumen de la solución alcalina desplazada de la botella de suero es medido en un cilindro graduado, permitiendo hacer la división entre el volumen de biogás inyectado y este. Lo cual resulta en la fracción o porcentaje de metano (CH_4) que contiene el biogás. Este es un método utilizado y recomendado por diversos

autores e instituciones, tales como (Field, 1987) y la Universidad Nacional de Colombia entre otras, a través de autores como Díaz, Espitia, & Molina (2002) .

En la Figura 7, se muestra el esquema utilizado para la construcción del sistema de medición de metano que permitió identificar el contenido de este gas en el biogás.

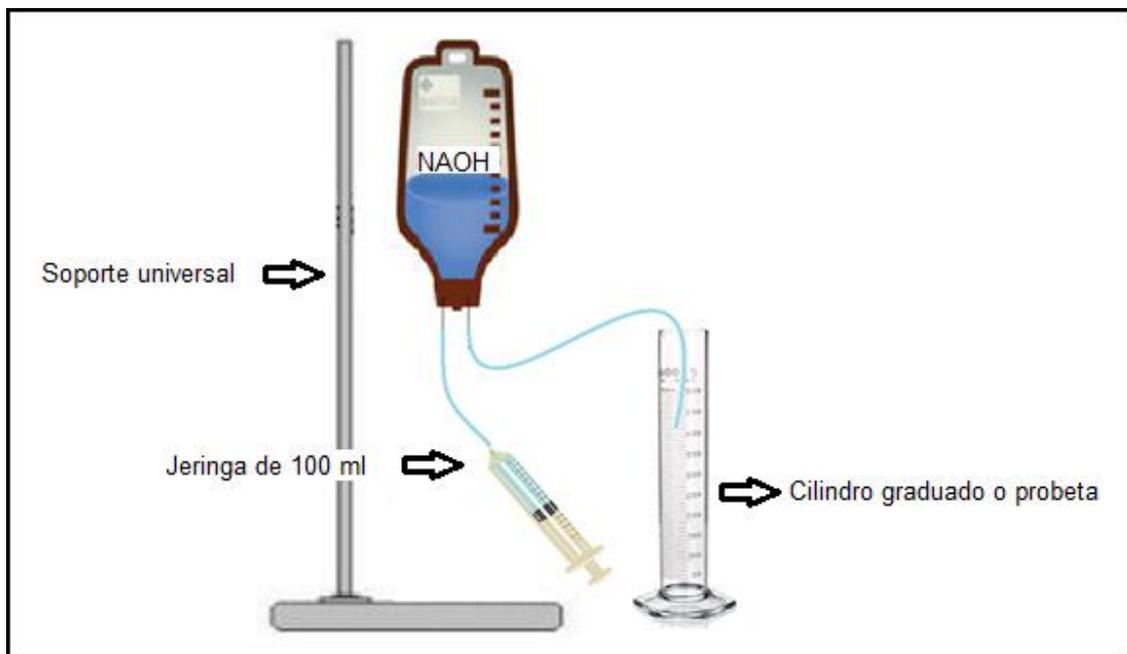


Figura 7: Esquema del sistema de medición de metano

3.6. Cálculos para la carga de los biodigestores

Los biodigestores de tipo Batch utilizados, consistieron básicamente en un reactor de 60 L, una salida para el líquido, una salida para el gas y un agitador/mezclador, por lo que el volumen o capacidad operacional del mismo se limitaba a los 60 L del reactor usado, como bien se mencionó anteriormente. En vista de ello, se calcularon los volúmenes correspondientes a las fracciones líquidas y gaseosas al interior del biodigestor. Estando compuesta la primera de

ellas por una fracción sólida (estiércol y chala de maíz más lodos activados) y la fracción líquida (agua) propiamente dicha, siendo equivalente al 75 % del volumen total del biodigestor (60 L) y la segunda de ellas, la fracción gaseosa equivalente al 25 % del volumen total del biodigestor (60 L) tal como se recomienda en diversos estudios. El cálculo de estos volúmenes se muestra en el Anexo 4.

3.6.1. Relación C/N de las excretas

Tal como se mencionó anteriormente, la relación C/N de las excretas caracterizadas resultó menor a la proporción óptima de 30/1, por lo que fue necesario elevar la cantidad de carbono del sustrato que ingresaría a los biodigestores agregando cierta cantidad de rastrojos de maíz; cantidad que resultaría de resolver la siguiente ecuación:

$$\frac{C}{N} = \frac{C1.X1 + C2.X2}{N1.X1 + N2.X2} \quad \dots (2)$$

Donde:

C1= % carbono seco de chala de maíz

N1= % nitrógeno seco de chala de maíz

X1= peso chala de maíz seco (kg)

C2= % carbono seco del estiércol

N2= % nitrógeno seco del estiércol

X2= peso de estiércol seco (kg)

C/N= Relación C/N (30/1)

Obteniendo de esta manera la cantidad de rastrojos de maíz necesaria en cada biodigestor para que la relación C/N del sustrato sea la óptima (30/1). Ver Anexo 3.

3.6.2. Relación materia orgánica - agua

Para establecer la relación materia orgánica – agua se determinaron las diluciones (peso de materia seca y peso de materia húmeda, es decir cantidad de estiércol y rastrojos de maíz y cantidad de agua) para la carga de los biodigestores. Según Restrepo (2001), la relación de materia orgánica y agua ideal varía de 1:3 a 1:5 siendo más recomendable utilizar una relación de 1:4. Para el caso de esta investigación se consideró una relación de 1:3, es decir 25 % de material sólido (excreta fresca más chala de maíz) y 75 % de agua, debido al mayor contenido de humedad que las excretas a utilizar presentan.

Adicionalmente dentro de cada biodigestor se agregó 3 % del volumen de sólidos de lodos provenientes de depuradora como parte de la mezcla que ingresaría al biodigestor, los mismos que permitieron acelerar y mejorar el proceso de digestión y posterior producción de biogás. Ver Anexo 4.

De esta manera, según la procedencia del estiércol, la relación C/N de las excretas y la relación materia orgánica – agua, quedaron definidos los 3 tratamientos ejecutados como parte de la investigación, los mismos que fueron realizados por triplicado para obtener representatividad en la evaluación. Siendo estos los siguientes:

- Tratamiento 1 (T1): estiércol de vacuno + chala de maíz
- Tratamiento 2 (T2): estiércol de camélido + chala de maíz
- Tratamiento 3 (T3): estiércol de equino + chala de maíz

3.6.3. Determinación de sólidos totales

Según Soria, Ferrara, & Etchevers (2000), el porcentaje óptimo de sólidos que debe contener la mezcla que será digerida en un biodigestor, debe ser cercano al 10 %. Por lo cual fue necesario calcular la concentración de sólidos que tendría la mezcla de estiércol y rastrojos de maíz inicialmente en cada tratamiento, concentración que posteriormente sería diluida. Este cálculo que se hizo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_c = \frac{X_1.M_1 + X_2.M_2}{X_1 + X_2} \quad \dots (3)$$

Donde:

M_c = Concentración de sólidos secos en la mezcla

X_1 = Peso del estiércol

X_2 = Peso de los rastrojos de maíz

M_1 = % de sólidos secos para el estiércol

M_2 = % de sólidos secos para los rastrojos de maíz

Esta ecuación permitió hallar la concentración de sólidos inicial de la mezcla de estiércol y rastrojos de maíz con la relación C/N óptima antes calculada. La

misma que luego de ser diluida con agua se reduciría hasta valores cercanos al 10 % tal como recomiendan diversos autores. Ver Anexo 6.

3.7. Control operacional del proceso de digestión anaerobia

La evaluación de los parámetros y el control operacional de los biodigestores se llevó a cabo desde el mes de febrero, en el cual se realizó la carga de los reactores, la cual incluye la adición del sustrato (estiércol más rastrojos de maíz y lodos activados como inóculo), la mezcla completa del mismo y el sellado de estos, dando inicio al proceso de digestión anaerobia. Los parámetros evaluados durante la experimentación fueron la temperatura, el pH y el porcentaje de metano contenido en el biogás.

3.7.1. Monitoreo de la variación temporal de temperatura

El monitoreo de la variación de temperatura tuvo lugar desde el mes de febrero, realizándose tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes entre las 10:00 am y las 11:00 am. La medición o monitoreo de este parámetro se realizó leyendo directamente de la pantalla digital de los termómetros instalado en los biodigestores.

3.7.2. Monitoreo de la variación temporal de pH

El monitoreo de la variación de pH tuvo lugar también desde el mes de febrero, realizándose tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes. La medición o monitoreo de este parámetro se realizó utilizando un potenciómetro Hanna HI98127 pHep 4 pH/Temperature Tester previamente calibrado, el cual era introducido directamente en la muestra hasta tener una lectura estable del mismo.

3.7.3. Monitoreo de la variación del porcentaje de metano en el biogás

Al igual que con los parámetros anteriores, el monitoreo de la variación del porcentaje de metano en el biogás tuvo lugar desde el mes de febrero, realizándose con la misma frecuencia de tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes. La medición o monitoreo de este parámetro se realizó impulsando a través de la solución alcalina, preparada a base de hidróxido de sodio (NAOH) y coloreada con fenolftaleína, la muestra de 100 ml de biogás extraída del biodigestor. Y dividiendo finalmente el volumen desplazado entre los 100 ml impulsados.

3.7.4. Periodo de retención hidráulico

Tal como indica Varnero (2011), el tiempo o periodo de retención hidráulico debió ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Asegurando de esa manera la degradación de la materia orgánica así como la producción de gas metano. Por otro lado, Sogari (2003) menciona que las curvas de generación de metano a partir de la degradación de materia orgánica, se asemejan a la de una función exponencial, en la que a medida que aumente el tiempo, la curva crece hasta un determinado punto en el que la generación de gas permanece constante, lo cual según Schulz (1996) permite evidenciar el término de la digestión anaerobia, continuando la producción de gas hasta el agotamiento de los sólidos volátiles en el sustrato utilizado. Bajo esa premisa es que se determinó el tiempo necesario para degradar la materia orgánica introducida en los biodigestores.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico de la variación de temperatura y la variación del pH durante el periodo de evaluación se realizó para cada tratamiento y repetición por separado, utilizando gráficas de dispersión realizadas en el programa Microsoft EXCEL.

En el caso del contenido de metano (CH₄) en el biogás, expresado en porcentajes, se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas con un nivel de significancia $p \leq 0.05$ utilizando el software IBM SPSS 22.0:

- Análisis de Varianza (ANOVA) para un diseño completamente al azar con tres repeticiones, el cual fue utilizado para medir la significación estadística de las diferencias entre las medias de los tratamientos evaluados.

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \epsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Variable respuesta de la ij-esima unidad experimental

μ = Efecto de la media general

t_i = Efecto del i-esimo tratamiento

ϵ_{ij} = Efecto del error experimental asociado a la i-esima unidad experimental

- Test de Duncan, utilizado para comparar las medias de los tratamientos después de haber rechazado la hipótesis nula de igualdad de medias o no existencia de diferencias significativas en la calidad del biogás según la proveniencia animal de la excreta mediante el análisis de varianza, permitiendo determinar cuál fue el mejor tratamiento.

IV. RESULTADOS

4.1. Caracterización química de los estiércoles

La caracterización química de los estiércoles consistió en analizar los contenidos de carbono total y nitrógeno total de las excretas provenientes del ganado vacuno, camélido y equino de la Unidad Zootécnica y el Centro del Caballo Peruano de Paso de la UCSUR respectivamente, con la finalidad de conocer la relación C/N inicial de ellas e identificar la necesidad de mezclarlas con rastrojos de maíz para obtener la relación C/N considerada óptima (30/1). Los resultados de esta caracterización se muestran en el Tabla 7.

Tabla 7: Análisis de la composición química de los estiércoles

Parámetro / Procedencia del	Carbono total (%)	Nitrógeno total (%)	Relación C/N	Relación C/N recomendada
Estiércol vacuno	36.65	1.69	21.69	30
Estiércol camélido	27.92	1.28	21.81	30
Estiércol equino	43.16	1.53	28.21	30

Fuente: LASPAF UNALM

Cabe resaltar que la relación C/N inicial se calculó a partir de la ecuación (1) (ver Anexo 2). Así mismo, la proporción de rastrojos de maíz necesaria para elevarla hasta el valor óptimo, se calculó mediante la ecuación (2) (ver Anexo 3).

4.2. Carga de los biodigestores

En la tabla 8 se muestran los volúmenes de carga empleados en los biodigestores. Los cálculos realizados para hallarlos se observan en el Anexo 4.

Tabla 8: Volúmenes de carga de los biodigestores

Volumen líquido (L)		Volumen de agua	Volumen gaseoso (L)	VT (L)
Volumen de mezcla			33.75 L	15 L
Volumen de estiércol + rastrojos de maíz	Volumen de lodos de			
10.9125 L	0.3375 L			

La cantidad específica de la mezcla de estiércol y rastrojos de maíz utilizados para alcanzar la relación C/N considerada óptima en cada tratamiento y la concentración de sólidos de esta mezcla se muestran en la tabla 9. Así mismo, los cálculos realizados para hallarlos se muestran en el Anexo 5 y 6 respectivamente.

Tabla 9: Cantidades de estiércol y rastrojos de maíz según tratamiento

Insumos	Cantidades (Kg)		
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
Estiércol	9.1471	8.427	10.4426
Rastrojos de maíz	1.7654	2.486	0.47
Total	10.9125	10.125	10.9125
Sólidos totales (%)	31.4	52.6	27.6

4.3. Monitoreo del desempeño de los biodigestores

Se realizó el monitoreo del funcionamiento de cada uno de los biodigestores instalados mediante el control de temperatura, pH y porcentaje de metano en el biogás durante 53 días, tiempo en el que se pudo observar la estabilización de los parámetros evaluados. Permitiendo identificar la máxima producción de metano para las condiciones dadas de acuerdo a los descrito por Schulz (1996) citado por (Sogari, 2003).

4.3.1. Monitoreo de la variación de la temperatura

La variación de la temperatura interna del biodigestor, la cual fue evaluada a lo largo de 53 días, en los meses de febrero, marzo y abril, se muestra en la figura 8. Así mismo, en el Anexo 7 se observan los datos de temperatura registrados por cada tratamiento y sus repeticiones y la temperatura media ambiental de los días evaluados.

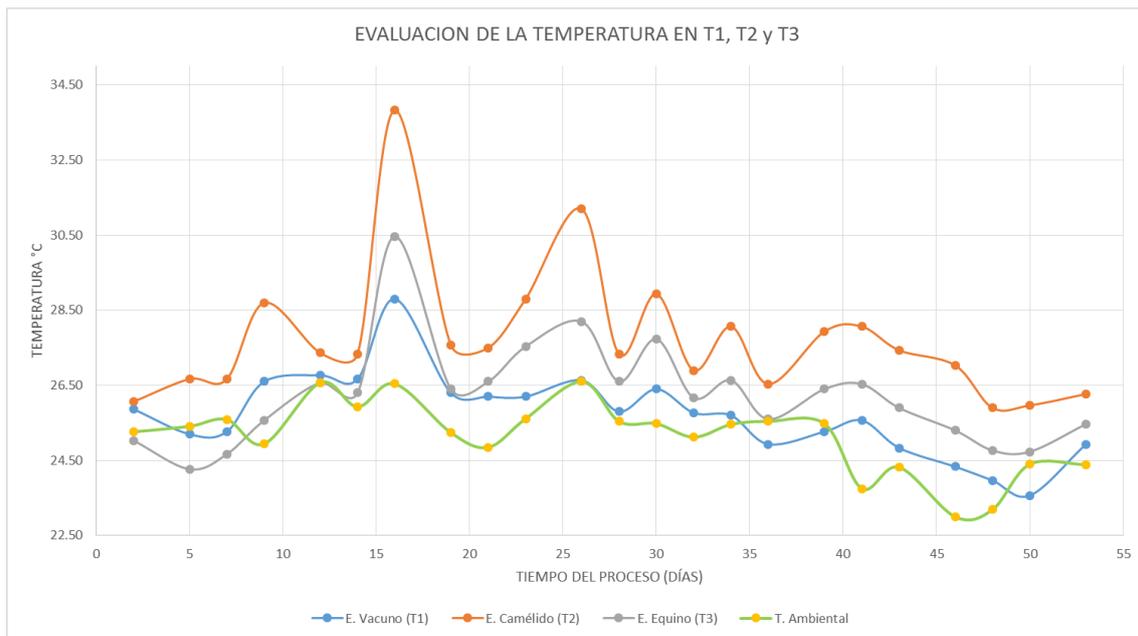


Figura 8: Variación de la temperatura durante el desempeño de los biodigestores.

En esta se puede apreciar que la variación de temperatura durante el proceso de digestión anaerobia fue bastante fluctuante, presentando durante las primeras dos etapas (hidrólisis y acidogénesis), una tendencia general ascendente que luego descendería lentamente hasta valores cercanos a los iniciales.

Por otro lado, se aprecia que las temperaturas más altas durante la evaluación se registraron en el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2), obteniendo una media de temperatura superior a las registradas en los otros tratamientos. Por el contrario, la media de temperatura más baja, la registra el tratamiento con excretas de ganado vacuno (T1). Cabe resaltar, que las temperaturas promedio de los 3 tratamientos oscilaron entre los 25.7 y 27.7 °C por lo que se mantuvieron siempre dentro del régimen mesófilo. Superando a su vez la temperatura ambiental promedio registrada por la Estación Meteorológica

Von Humboldt del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para los días de evaluación.

Se observa también que el ascenso de temperatura al interior de los biodigestores en el tratamiento 1 (E. vacuno) inicia a los 5 días de haber puesto en marcha el mismo, prolongándose hasta el día 16, a partir del cual la temperatura desciende. A diferencia de este, en el tratamiento 2 (E. Camélido), el ascenso de temperatura inicia recién a los 7 días de haber puesto en marcha los biodigestores, prolongándose hasta el día 26 a partir del cual la temperatura también empieza a descender. Finalmente, en el tratamiento 3 (E. equino), el ascenso de temperatura se da a partir del quinto día como en el caso del primer tratamiento, sin embargo, se prolongó hasta el día 26 en el que inició su descenso.

4.3.2. Monitoreo de la variación del pH

Al igual que la variación de la temperatura, la variación de los valores de pH del efluente retirado del biodigestor fue evaluada durante 53 días. En la figura 9 se muestra la variación de estos valores durante el desempeño de los biodigestores. Los datos registrados por cada tratamiento y sus repeticiones se muestran en el Anexo 8.

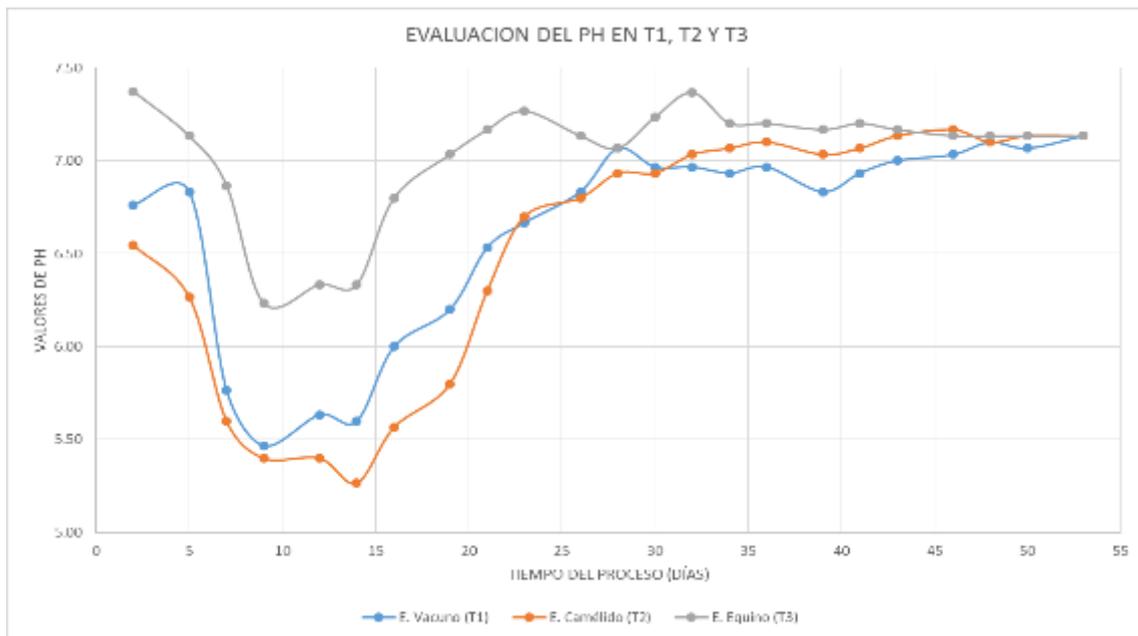


Figura 9: Valores de pH durante el desempeño de los biodigestores.

En la figura 9 se observa que los tres tratamientos iniciaron con un pH relativamente neutro (6.5 – 7.4), presentando una clara disminución en los valores desde los primeros días luego de haber puesto en marcha los biodigestores, disminución que tendría lugar gracias a la formación de nuevos compuestos durante las fases de hidrólisis y acidogénesis, en especial ácidos grasos. Estos valores luego ascenderían hasta lograr estabilizarse cerca del día 34 de evaluación, a partir del cual fueron casi constantes.

Por otro lado, se aprecia que el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2), fue el que registró los valores más bajos de pH. Mientras que los más altos se registraron en el tratamiento con excretas de ganado equino (T3). Como bien se menciona en el párrafo anterior, los valores de pH de todos los tratamientos finalmente se estabilizaron cerca del día 34 hasta el final del periodo de evaluación, registrando valores de entre 7.0 y 7.2

Se observa también que el descenso del pH en el tratamiento con excretas de ganado vacuno (T1) se produce a partir del quinto día de haber puesto en marcha el biodigestor, prologándose hasta el noveno, a partir del cual el pH aumenta progresivamente hasta el día 28, en el que los valores de pH comienzan a estabilizarse. Sin embargo, es a partir del día 41 en el que los valores alcanzan una mayor estabilidad, consiguiendo finalmente valores muy cercanos entre una evaluación y otra. A diferencia de este primer tratamiento, el descenso de los valores de pH en el segundo y tercer tratamiento (excretas de ganado camélido y excretas de ganado equino respectivamente) se da casi de manera instantánea, iniciando su descenso desde el primer día de evaluación (segundo día luego haber puesto en marcha los biodigestores). Prologándose hasta el catorceavo día en el segundo tratamiento, y hasta el noveno en el tercero, a partir de los cuales los valores de pH aumentan progresivamente hasta el día 36 y 32 respectivamente, en los que los valores de pH comienzan a estabilizarse en torno a valores cercanos a la neutralidad (7.0).

4.3.3. Monitoreo de la variación del porcentaje de metano en el biogás

La variación del porcentaje de metano (CH_4) en el biogás durante el desempeño de los biodigestores, la cual al igual que los parámetros de temperatura y pH, fue evaluada a lo largo de 53 días y según la metodología descrita, se muestra en el Figura 10. Así mismo, los valores de porcentaje de metano registrados en el biogás por cada tratamiento y sus repeticiones se muestran en el anexo 9.

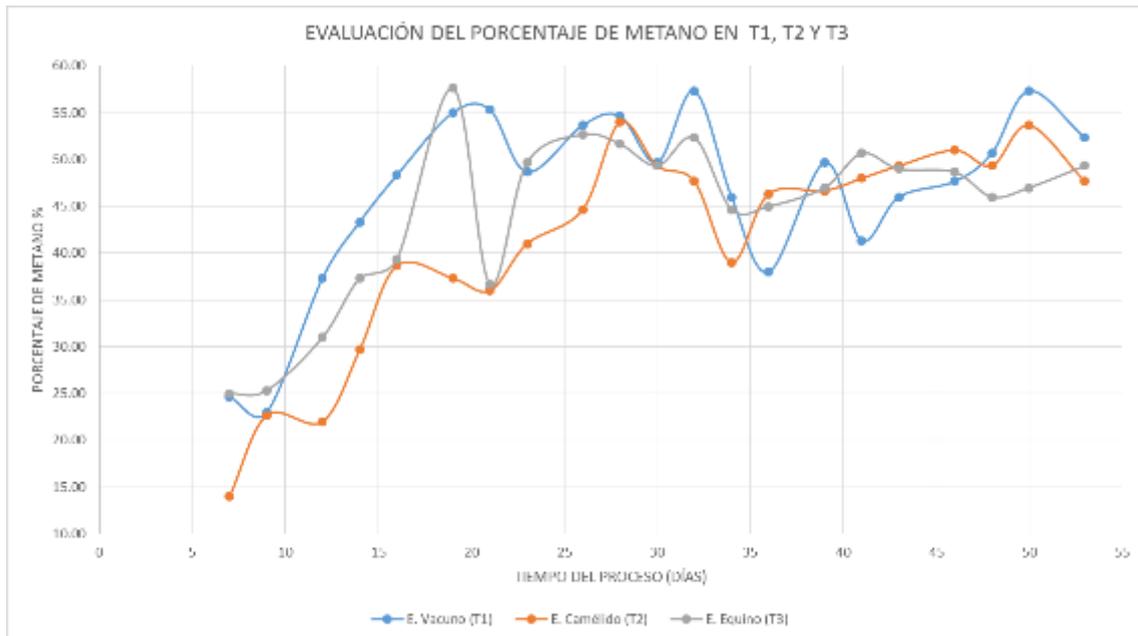


Figura 10: Variación del porcentaje de metano (CH₄) en el biogás durante el desempeño de los biodigestores.

Tal como se observa en ella, los valores de porcentaje de metano en el biogás, muestran una tendencia ascendente desde el primer día de evaluación (correspondiente al quinto día de haber puesto en marcha los biodigestores) hasta aproximadamente el día 28, a partir del cual se muestran menos variables, sin embargo no es hasta el día 41 en el que la variabilidad en los datos se reduce aún más, logrando mantenerse relativamente estables y dando a entender que la producción máxima para las condiciones dadas se ha alcanzado.

Así mismo, se aprecia también que los porcentajes o concentraciones de metano en el biogás más altos los registra el tratamiento con excretas de ganado vacuno (T1). Obteniendo las mayores concentraciones de este gas durante la mayor parte del proceso de digestión anaerobia. Por el contrario, las menores

concentraciones de este durante la mayor parte del proceso, se registraron en el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2).

Por otro lado, de acuerdo al tratamiento estadístico al cual fue sometida esta variable, se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tratamientos, siendo el tratamiento con excretas de ganado vacuno el que mayor concentración de metano generó en el biogás con una media de 46,67 %, seguido del tratamiento con excretas equinas con una media de 44,54 %; mientras que el tratamiento con excretas camélicas fue el que menor concentración obtuvo con una media de 41,33 %. Tal como se muestra en la Figura 11. Ver anexo 10.

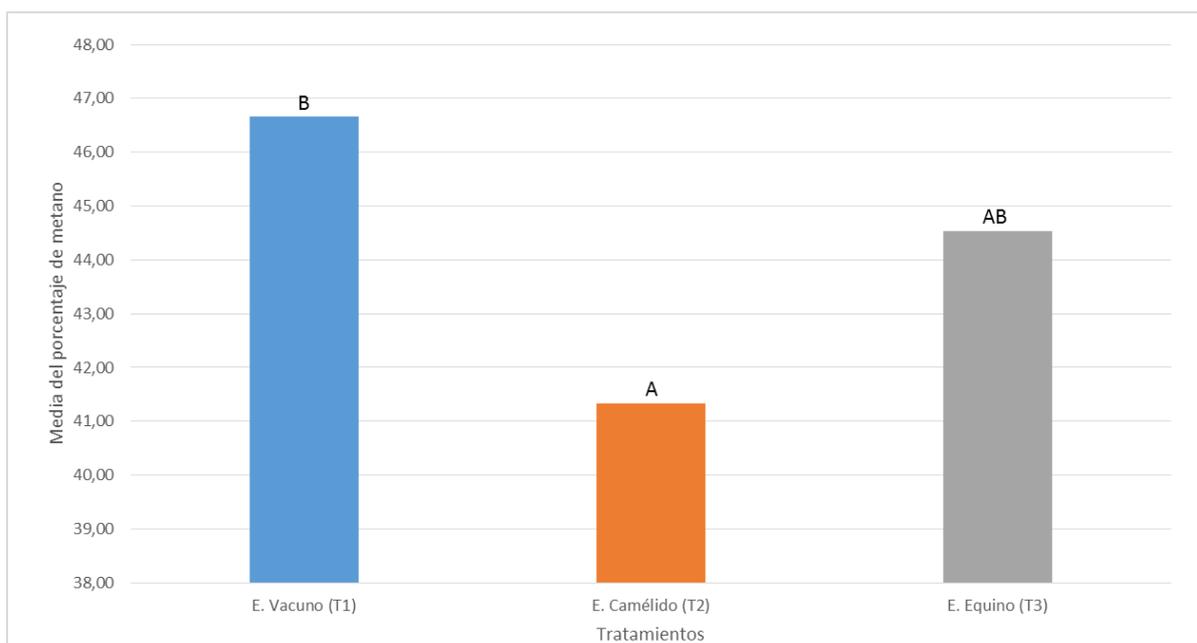


Figura 11: Medias del porcentaje de metano (CH_4) en el biogás por tratamiento durante el desempeño de los biodigestores. Los valores muestran el promedio de 21 repeticiones ($n=21$). Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos.

V. DISCUSION DE RESULTADOS

Diversas investigaciones destacan el potencial energético del biogás producido a partir de estiércoles animales, así como el consecuente mejoramiento en la gestión de residuos agropecuarios y sus beneficios (Arce, 2011; Doroteo, 2012; Pazmiño K. , 2016; Moscoso, 2010, entre otros), es por ello que surge la necesidad de comparar el potencial energético del biogás producido a partir de 3 especies animales sometidas a crianza para diversos fines en el Perú.

Como bien mencionan los resultados de la presente investigación, el periodo de evaluación se extendió durante 53 días, iniciando el 15 de febrero y finalizando el 10 de abril de 2017. Sin embargo, si se observan las gráficas de resultados, a partir del día 41 se aprecia que el comportamiento de los parámetros evaluados (temperatura, pH y concentración de metano en el biogás) empieza a mostrar la tendencia descrita por Sogari (2003), la cual permite identificar el tiempo en el que se alcanza la producción máxima del proceso bajo las condiciones dadas y la estabilización del mismo. Y es que la concentración de metano en el biogás producido logra alcanzar cierta estabilidad, presentando valores más constantes. Así mismo, ese día coincide con la estabilización de los valores de pH y la caída de temperatura con mayor intensidad. Lo cual concuerda con lo descrito por Varnero (2011), que, para regiones con climas cálidos como el área de estudio, el periodo de retención hidráulico para un correcto desarrollo de la digestión anaerobia es de aproximadamente 40 días.

Por otro lado, es conocido que los procesos biológicos son fuertemente dependientes de la temperatura, es por ello que se le reconoce como un parámetro determinante a la hora de llevar a cabo un adecuado proceso biológico como la digestión anaerobia, en el que mientras mayor sea la temperatura, mayor será la producción de biogás. En cuanto al proceso efectuado en esta investigación, se observa que la temperatura media de los tratamientos se encuentra entre 25.72 y 27.74 °C, lo cual corresponde a un proceso de régimen mesofílico según lo expuesto por Martí (2006) y Mosquera & Martínez (2012). Por lo que, si bien presenta una menor velocidad de reacción que un proceso termofílico, resulta más estable y presenta menos problemas de inhibición por toxicidad de algunos compuestos a altas temperaturas, como los ácidos grasos de cadena larga o el nitrógeno amoniacal.

Si observamos la gráfica de temperaturas a lo largo del periodo de evaluación (Figura 8), notamos que, debido a los procesos exotérmicos llevados a cabo al interior de los biodigestores, la temperatura media de los tratamientos superó en casi todos los registros a la temperatura ambiental promedio del día de evaluación, la cual fluctuó entre los 23 y 26.6 °C y permitió que el proceso se desarrolle en el rango mesofílico. En caso que la temperatura ambiental hubiese sido menor, eventualmente el proceso se hubiese desarrollado en el rango psicrófilico con todas las diferencias que ello hubiera conllevado. Cabe resaltar que en términos generales ambas temperaturas siguieron la misma tendencia, los días que la temperatura ambiental descendió, la temperatura al interior de los biodigestores también lo hizo. Esto se debió básicamente a la exposición de estos a la intemperie, los cuales no presentaban ningún tipo de aislamiento térmico o barrera física frente a las condiciones climáticas. Así mismo, se

observa una variación bastante marcada entre los días 15 y 30, que en el peor de los escenarios registro una variación de 6.5 °C entre una evaluación y otra. Variación que pudo darse por la misma exposición de los biodigestores y que según lo descrito por Varnero (2011) podría haber supuesto un problema para el correcto desarrollo del proceso, viéndose afectada la producción de biogás. Sin embargo otros autores como Álvarez, R., Vilca, S., & Lidgen, G. (2006) citados por (Pazmiño A. , 2012) indican que la actividad metanogénica es suficientemente robusta como para resistir variaciones diarias de temperatura de hasta 14 °C, concentrándose la producción de biogás durante los periodos de temperatura más altos, por lo que dicha variación no supuso ningún problema para el correcto desarrollo del mismo. Esto también podría explicarse debido a que las temperaturas del proceso estuvieron siempre en el rango mesofílico, lo cual habría atenuado los posibles efectos negativos por variación de temperatura que se hubieran presentado si la temperatura promedio hubiese sido más alta.

Si se observa el comportamiento de la temperatura en cada tratamiento, el tratamiento 2 es el que presenta mayores registros a lo largo de todo el proceso. Esto se debió básicamente a la mayor concentración de sólidos que tuvo. Lo cual requirió un mayor gasto energético para hidrolizar la materia, incrementando la temperatura a lo largo del proceso. En cambio, la concentración de sólidos en el caso de los otros dos tratamientos fue menor y similar entre ellos, por lo que presentaron una menor temperatura durante la evaluación.

En cuanto al comportamiento de los valores de pH, diversos autores como Pazmiño A. , 2012; García – Caro, 2013, entre otros, señalan como valores

recomendados para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia aquellos comprendidos entre 6.5 y 7.6, siendo óptimo valores de entre 6.8 y 7.2, es decir lo más cercano posible a un pH neutro, ya que las bacterias acetogénicas y metanogénicas, especialmente estas últimas, involucradas en las últimas dos etapas del proceso (acetogénesis y metanogénesis) son muy sensibles a este parámetro, llegando a ser inhibidas por algunas sustancias como el amoníaco libre a pH mayores a 8.5, sin embargo autores como Solera del Río (2014) indican que a temperaturas cercana a 25 °C, tal como las registradas en esta investigación, la fracción de amonio que se presenta como amoníaco libre es escasa, por lo que no hubiese representado ningún problema. Así mismo, Perez J. (2010) señala que el valor de pH para las fases de hidrólisis y acidogénesis en las que se produce la disolución y rotura por fermentación de los biopolímeros grandes para dar como resultado moléculas más pequeñas que luego son reducidas a hidrógeno molecular, dióxido de carbono y ácidos grasos volátiles, está en el rango de 5.2 a 6.3. Dicho comportamiento registrado en diversas investigaciones anteriores, calza perfectamente con los valores registrados durante esta investigación, en la cual se observa un descenso en los valores de pH desde aproximadamente el quinto día de evaluación y que se mantienen dentro del rango descrito por Perez J. (2010) para las fases de hidrólisis y acidogénesis hasta el día 19, en el cual los valores empiezan a sobrepasar ese rango para acercarse al descrito por Pazmiño A. , 2012; García – Caro, 2013, alcanzándolo el día 26, a partir del cual se mantienen casi constantes dentro del rango óptimo para que se produzca la acetogénesis y metanogénesis, en las cuales se liberó el ácido acético que sirvió de alimento para que las bacterias

metanogénicas produzcan el metano como producto de desecho, asegurando una buena producción de biogás.

Si se observa el comportamiento de este parámetro en cada tratamiento en particular, el tratamiento con excretas de equino, presenta los valores más altos de pH a lo largo del proceso, disminuyendo solo hasta 6.23 y llegando hasta valores ligeramente superiores a 7.2, esto pudo deberse a la alcalinidad bicarbonatada, la cual debió haber sido lo suficientemente alta para evitar que los ácidos grasos lo disminuyan hasta valores próximos a los de los otros tratamientos, en los cuales el pH logró alcanzar valores bastantes más bajos, comparables como se mencionó anteriormente a los expuestos por Perez J. (2010), y presentando a su vez un comportamiento bastante similar entre sí. Es decir que, en el caso del tercer tratamiento, la tasa de producción de ácidos grasos volátiles no supero a la tasa de consumo de estos, evitando su acumulación y la acidificación que ello habría supuesto (Cajigas, Perez, & Torres, 2005).

La producción de gas metano, por su parte, depende de diversos factores, entre los más importantes, la proveniencia de la materia prima a ser digerida, que para el caso de la investigación fue el factor determinante de los tratamientos, la relación carbón nitrógeno de esta, que para la investigación fue de 30/1 en todos los casos, la temperatura a la cual es llevado el proceso y el pH en el cual se desarrolla. Factores que, dependiendo de su comportamiento, afectan de una u otra manera a la producción final de biogás y su concentración de metano. Sin embargo, en términos generales, y de acuerdo a los descrito por Schulz H. en 1996 (citado por Sogari, 2003) la generación de metano describe siempre una

curva en función exponencial, en la que a medida que el tiempo del proceso transcurre, la curva crece hasta un determinado día o tiempo t , a partir del cual la producción de gas metano ha alcanzado el máximo valor posible para ese proceso y esas condiciones. Comportamiento que puede ser visualizado en la Figura 9, en la que, si bien no deja de existir una variación, la cual es atribuible al margen de error que presenta el método empleado frente a una cromatografía de gases, tal como lo describe López (s.f.), esta se hace cada vez menor, dando cuenta de haber alcanzado el máximo valor de metano para cada tratamiento realizado.

En cuanto a la relación que existe entre la temperatura y la concentración de metano en el biogás producido, es conocido que la temperatura del reactor afecta la ecología del mismo, favoreciendo la presencia de especies que no se desarrollan bien a otras temperaturas, beneficiando o perjudicando a la producción de biogás según sea el caso. Investigaciones como la de Quintero & Rondón (2012) mencionan que, si bien la actividad hidrolítica del proceso no se ve inhibida por la temperatura entre los 25 y 40 °C en condiciones controladas, la producción de metano sí, y es que la temperatura afecta directamente a las velocidades de reacción biológicas, influenciando la actividad metabólica de los microorganismos intervinientes en la digestión anaerobia. Es por ello que, a mayores temperaturas, la hidrólisis de sólidos es más rápida, resultando en una mayor degradación de la materia orgánica que finalmente sirve de alimento para las bacterias que intervienen en las demás etapas. En vista de ello, las temperaturas registradas durante la investigación podrían haber supuesto una

baja tasa de hidrólisis, mermando la producción de alimento para los microorganismos intervinientes en las demás etapas.

Por otro lado, si se comparan las gráficas de pH de todos los tratamientos con las de concentración de metano, podemos observar el comportamiento existente entre ambos parámetros, el cual concuerda con lo descrito por García - Caro, (2013), en el que los valores de pH acusaron una disminución inicial hasta valores comprendidos entre cinco y seis, ascendiendo hasta valores estables en los que la producción de metano alcanzaría su tope y se mantendría también estable, describiendo una curva similar a la presentada por Schulz H. en 1996. Así mismo, autores como Varnero (2011) mencionan que una de las consecuencias de que los valores de pH desciendan por debajo de cinco es que el biogás generado sea pobre en metano, presentando a su vez cualidades energéticas también pobres. Ello quedó demostrado en la investigación realizada por Quintero & Rondón (2012), en la que hallaron diferencias significativas en la producción de metano a un pH 7 frente a un pH 4.3. Esto se debió a que los grupos bacterianos que actúan en las distintas fases de la digestión anaerobia tienen un rango de pH dentro del cual pueden crecer. Siendo 4.3 un pH que causa inestabilidad al interior del reactor, lo que conlleva a una acumulación de ácidos grasos volátiles que causan la caída del pH y la acidificación del medio. En el caso de la presente investigación, el comportamiento de pH fue el adecuado acusando una disminución inicial

Como bien se menciona en el capítulo anterior, luego de realizar la prueba de Duncan de los tres tratamientos realizados para comparar la media de ellos, el

que mayor porcentaje de metano a lo largo del proceso logró obtener, fue el tratamiento 1 (excretas de vacuno), el cual obtuvo una media de 46,67 % frente al 44,54 % del tratamiento con excretas de equino (T3) y el 41,33 % del tratamiento con excretas de camélido (T2). Concentraciones que resultan relativamente bajas si consideramos estudios realizados anteriormente, sobre todo aquellos realizados con estiércoles vacunos como es el caso del primer tratamiento. En los cuales se suelen obtener concentraciones cercanas al 60 % de metano (Saucedo, 2007; Heredia, Aguilar, & Valdez, 2015; Alvarez, Villca, & Lide'n, Biogas production from llama and cow manure at high altitude, 2006; Ukpai & Nnabuchi, 2012). Estas bajas concentraciones fueron probablemente causadas por la falta de un pre tratamiento físico que redujera significativamente el tamaño de las partículas orgánicas que fueron introducidas en la mezcla y el alto contenido de sólidos en esta última, que no permitieron una correcta hidrólisis y fermentación de los compuestos que luego servirían de alimento para las bacterias metanogénicas y que finalmente afectarían a la producción de metano.

Cabe resaltar que la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato o mezcla, se ve crecientemente limitada a medida que el contenido de sólidos aumenta, y por lo tanto se afecta la eficiencia y producción del biogás. Por ende, la relativamente alta concentración de sólidos en los tratamientos realizados en esta investigación debió afectar al contenido final de metano en el biogás generado, debido a la menor movilización de las bacterias.

Así mismo, diversos factores adicionales como la temperatura, afectan la concentración de metano en el biogás, es así que diversas investigaciones destacan la importancia de este parámetro y evalúan los efectos de esta sobre

la concentración de este gas, tal como la realizada por Rosenkranz, Chamy, & Lema (2013), en la que se evalúa el rendimiento de metano a diferentes temperaturas, mostrando que a una temperatura controlada de 30° C, el rendimiento de metano se redujo solo en 3 % en comparación con 35°C, sin embargo observaron una reducción de 17,4 % al realizar la digestión a 25° C, lo que también podría explicar la relativamente baja concentración de este gas en los tratamientos realizados.

VI. CONCLUSIONES

- La relación C/N inicial de los estiércoles utilizados resultó menor a lo considerado óptimo (30/1) por lo fue necesario mezclarlos con rastrojos de maíz hasta conseguir la relación deseada.
- Los 9 biodigestores de polietileno de alta densidad de 60 litros de capacidad operacional cada uno construidos, los cuales contaban con cierre hermético, una salida para el biogás, un termómetro y una salida para el bioabono, resultaron ser eficientes y cumplieron su función en la investigación realizada.
- La temperatura registrada en los tres tratamientos se mantuvo dentro del régimen mesofílico. Teniendo el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2) la media más alta (27.74 °C), seguido del tratamiento con excretas de ganado equino (26.24 °C) y finalmente el tratamiento con excretas de ganado vacuno (25.72 °C).
- El pH de los tres tratamientos se mantuvo dentro de los rangos descritos por diversos autores, siendo el tratamiento con excretas de ganado camélido (T2) el que registró valores más bajos (hasta 5.27), mientras que el tratamiento con excretas de ganado equino registró los más altos (7.37).
- A partir del día 34 los valores de pH se mantuvieron dentro del rango óptimo (6.8 – 7.2) para un adecuado proceso de digestión anaerobia.
- Temperaturas más elevadas a lo largo del proceso hubieran permitido hidrolizar mejor la materia, dando lugar a una mejor producción de metano.

- Si los valores de pH hubieran descendido por debajo de 5 durante el arranque del proceso, la producción de metano se hubiese visto afectada, mermando las características combustibles del biogás producido.
- El periodo de retención hidráulico para las condiciones dadas en la presente investigación resultó ser de aproximadamente 41 días, sin embargo, las evaluaciones tuvieron lugar durante 53 días para asegurar que así fuera.
- Luego de realizar el análisis estadístico, se identificó que existen diferencias significativas en el potencial energético del biogás producido según la proveniencia animal de los estiércoles.
- De acuerdo a la prueba de Duncan realizada, el biogás con mayor contenido de metano, es decir con mayor potencial de generación de energía resultó ser aquel producido con excretas de ganado vacuno (T1), teniendo una media de 46.67 % de metano en su composición, seguido del biogás producido con excretas de ganado equino (T3), con 44,54 % de metano en su composición y finalmente el biogás producido con excretas de ganado camélido (T2), con 41,33 % de metano en su composición.

Los resultados de la investigación permiten evidenciar que, entre las excretas probadas, la que mayor potencial energético presenta es la proveniente del ganado vacuno, lo cual sumado a la mayor población de este en el país, representa una fuente importante de energía con potencial de ser aprovechada, y fácilmente sustituir a otras fuentes más contaminantes como la bosta en las áreas rurales del Perú y a los combustibles fósiles empleados en grandes centros

ganaderos, disminuyendo de esa manera los efectos negativos sobre la salud y la calidad del medio ambiente que estas prácticas generan.

VII. RECOMENDACIONES

- Estudiar con mayor profundidad el potencial energético de las excretas vacunas a diversas concentraciones y/o con diferentes mezclas, logrando obtener mayores concentraciones de metano y por ende mayor potencial energético.
- Elevar y controlar la temperatura del proceso para reducir los tiempos de retención y hacerlo más estable, ya sea controlando la temperatura ambiental del entorno en donde se llevará a cabo el proceso o controlando la temperatura al interior de los biodigestores.
- Realizar un pre tratamiento físico de trituración los sólidos utilizados como parte del sustrato, para de esa forma permitir una hidrolisis de los compuestos más rápida y más eficiente que permita finalmente conseguir una mayor producción de metano.
- Optimizar la concentración de sólidos de la mezcla que será cargada a los biodigestores para optimizar el proceso y obtener tiempos de retención más cortos.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Acosta, Y., & Abreu, M. (2005). La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I.
- al, A. e. (julio-diciembre de 2011). *EXPRESIÓN GENÉTICA EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA: UN PASO ADELANTE EN LA COMPRENSIÓN DE LAS INTERACCIONES TRÓFICAS DE ESTA BIOTECNOLOGÍA*. Obtenido de Posgradoeinvestigacion:
<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/AQM/No.%206/3.html>
- Alfonzo, J., & Zuñiga, J. (Junio de 2006). Evaluación del potencial hidrógeno (pH) en la mezcla de un biodigestor para la producción de biogas. *Tesis*. Cohauila, México: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO".
- Álvarez, A. (2004). Producción anaeróbica de biogás aprovechamiento de los residuos del proceso anaeróbico. *Instituto de Investigaciones en Procesos Químicos Lideproq*, 13-64.
- Alvarez, R., Villca, S., & Lidén, G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *ScienceDirect*.
- Alvarez, R., Villca, S., & Lidén, G. (2005). Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *Science Direct*, 5-7.
- Aparcana Robles, S., & Jansen, A. (01 de 12 de 2008). Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso "Fermentación Anaerobica" para Producción de Biogas. Lima, Lima, Perú.
- Aparcana, S., & Jansen, A. (2008). *Estudio sobre el valor fertilizante de los Productos del Proceso "Fermentación Anaeróbica" para Producción de Biogas*. Lima: German ProfEC - Perú SAC.
- Aparcana, S., & Jansen, A. (1 de 12 de 2008). Estudio sobre el Valor Fertilizante de los Productos del Proceso "Fermentación Anaerobica" para Producción de Biogas. Lima, Lima, Perú.
- Arce, J. (2011). Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.

- Baethgen, W. E., & Martino, D. L. (2001). Emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores agropecuario y forestal de Uruguay y oportunidades en el mercado de carbono. *ALPA*, 9(2), 127-134.
- Banco Mundial. (11 de Enero de 2015). *Consumo de Energía Procedente de Combustibles Fósiles*. Obtenido de Banco Mundial Sitio Web: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>
- Besel, S. (Octubre de 2007). *Biomasa Digestores Anaerobios*. Obtenido de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf
- Biodigestor: Alternativa Energética*. (31 de enero de 2018). Obtenido de http://www.feriadelasciencias.unam.mx/anteriores/feria20/feria254_01_biodigestor_alternativa_energetica.pdf
- Boone, D., Chynoweth, D., Mah, R., Smith, P., & Wilkie, A. (1993). Ecology and microbiology of biogasification. *Biomass and Bioenergy*, 5(3) 191-202.
- Cajigas, A., Perez, A., & Torres, P. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *ResearchGate*, 244.
- Carhuancho, F. (24 de 04 de 2012). *Aprovechamiento de Estiercol de Gallina para la Elaboración de Biol en Biodigestores Tipo Batch como Propuesta al Manejo de Residuo Avícola*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria la Molina: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1769/P06.C375-T.pdf?sequence=1>
- Carhuancho, F. (2012). *Aprovechamiento del Estiércol de Gallina para la Elaboración de Biol en Biodigestores Tipo Batch como Propuesta al Manejo de Residuos Avícola*. Lima, Lima, Perú: UNALM.
- Carmona, J. C., Bolívar, D. M., & Giraldo, L. A. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 49-63.
- Cepero, L., & al., e. (2012). Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*.
- Condori, O. (2008). *Evaluación participativa del riego deficitario y de fertilización orgánica sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (Chenopodium*

- quinoa willd*) en el altiplano sur. Obtenido de Universidad Mayor de San Andres: <http://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/6885/T-2168.pdf?sequence=1>
- Constanza, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Scielo*, 65-66.
- Creamer, K., Chen, Y., Williams, C., & Cheng, J. (2010). Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure. *AGRIS - FAO*, 3020-3024. Obtenido de FAO.
- Da costa, C. (2013). Biogas as an energy option: an overview. En *The Biogas Handbook* (págs. 1-2). Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi: Woodhead Publishing Limited.
- DAF. (24 de 01 de 2018). *Manure production data*. Obtenido de Department of Agriculture and Fisheries: <https://www.daf.qld.gov.au/environment/intensive-livestock/cattle-feedlots/managing-environmental-impacts/manure-production-data>
- Demirel, B., & Scherer, P. (2009). Bio-methanization of energy crops through mono-digestion for continuous production of renewable biogas. *Renewable Energy*, 34(12), 2940-2945.
- Díaz de Basurto, A. (2013). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO CON RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN EL MERCADO DE TIQUIPAYA (BOLIVIA)*. Tiquipaya: Escola de Camins.
- Díaz, M., Espitia, S., & Molina, F. (Junio de 2002). Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Doroteo, J. (2012). *APROVECHAMIENTO DE BIOGAS PROVENIENTE DEL ABONO DE GANADO VACUNO EN UN ESTABLO UBICADO EN IXTAPALUCA ESTADO DE MEXICO*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional.
- EPA. (2006). Global Anthropogenic Non-CO2 greenhouse gas emissions: 1990-2020. pp. 274. USA: United States Environment Protection Agency.
- Espinal, J., Olvera, O., Hernandez, V., & Morillón, D. (2016). Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan. *UNAM*, 47-49.

- FAO. (2006). *Livestock's Long Shadow*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernandez, J., Pérez, M., & Romero, L. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *ScienceDirect*, 6075–6080.
- Field, J. (1987). Medición de parámetros. En A. U. Wageningen. Cali: Cepis.
- García - Caro, L. (Noviembre de 2013). Estudio del comportamiento del tratamiento anaerobio de fangos ante modificaciones en la entrada. *Tesis*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- García, K. (27 de 01 de 2018). *Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales*. Obtenido de Universidad de Cadiz: <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/7413/VERSION%20FINAL.pdf?sequence=1>
- Geosilex. (18 de Marzo de 2016). *El Calentamiento los GEI (Gases de Efecto Invernadero)*. Obtenido de Geosilex: <http://www.geosilex.com/calentamiento-global/gases-efecto-invernadero>
- Gerardi, M. H. (2003). *Anaerobic Digestion Stages*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Guitierrez, H., Trujillo, G., & Martínez, M. (10 de Febrero de 2010). PLAN ESTRATEGICO DEL SECTOR GANADERO BOVINO. Lima, Lima, Perú.
- Heredia, P., Aguilar, O., & Valdez, I. (2015). Potencial de producción de biogás a través de la co-digestión de excretas vacunas y ensilado de sorgo. *CITECSA*, 53.
- Hilbert, J. (2006). Manual para la producción de biogás. *Instituto de Ingeniería Rural. I.N.T.A. Castelar. Buenos Aires, Argentina*, 7-30.
- Huachi, L. (2008). *Mejoramiento del suelo mediante la producción de un abono orgánico a partir de estiércol animal, en el parque Metropolitano de Quito*. Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Iglesias, L. (1994). El Estiércol y Las Prácticas Agrarias Respetuosas con el Medio Ambiente . *Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación*, 5-6.
- INEI. (2012). *IV CENAGRO*. Lima: MINAGRI.
- INEI. (2013). *Resultados Definitivos IV Censo Nacional Agropecuario 2012*. Lima: MINAGRI.

- INEI. (15 de Enero de 2015). *Resultados Definitivos del IV Censo Nacional 2012*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Riego Sitio web: INEI. (2012). Resultados Definitivos del IV Censo Nacional 2012. 15/01 <http://proyectos.inei.gob.pe/web/DocumentosPublicos/ResultadosFinalesIVCENAGRO.pdf>
- INIA. (21 de Abril de 2017a). *Instituto Nacional de Investigación Agraria*. Obtenido de <http://www.inia.gob.pe/files/crianzas/bovinos.pdf>
- INIA. (22 de Abril de 2017b). *Instituto Nacional de Investigación Agraria*. Obtenido de <http://www.inia.gob.pe/files/crianzas/camelidos.pdf>
- López, G. (s.f.). Método no Convencional de Medición de Gases en la Digestión Anaerobia Estimación del Procentaje de Metano Presente en el Biogás. *Centro de Investigación y Desarrollo Científico*, 13 - 14.
- Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la Química Ambiental*. España: Reverté.
- Manual del Biol.* (12 de 11 de 2017). Obtenido de Sistema Bio Bolsa: <http://sistemabiobolsa.com/pdf/manualDeBiol.pdf>
- Martí, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Florida: Dissertation.
- MINAGRI. (14 de Noviembre de 2012). Aprueban Reglamento de Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario. *El Peruano*.
- MINAGRI. (14 de Noviembre de 2012). Aprueban Reglamentode Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario. *El Peruano*, pág. 2.
- MINAGRI. (28 de Febrero de 2016). *Ministerio de Agricultura y Riego*. Obtenido de <http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manualesboletines/bioenergia/biodigestores.pdf>
<http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manualesboletines/bioenergia/biodigestores.pdf>
- MINAM. (2016). *El Perú y el Cambio Climático Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Lima: Ministerio del Ambiente.
- MINEM. (2014a). *The Golden Book COP 20*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- MINEM. (2014b). *Plan Energético Nacional 2014-2025*. Lima: Dirección General de Eficiencia Energética - Ministerio de Energía y Minas.
- MINEM. (2016). *Evolución de indicadores del sector eléctrico 1995 - 2015*. Lima: Dirección General de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas.

- Mönch-Tegeder, M. (2013). Investigation of the methane potential of horse manure. *CIGR journal*, 11-13.
- Moscoso, D. (2010). *Potencial de la digestión anaerobia en la unidad de ganado lechero de Zamorano*. Zamorano.
- Mosquera, J., & Martínez, B. (2012). *Evaluación de la Digestión Anaerobia como Alternativa de Estabilización de Biosólidos Producidos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira, Colombia.
- ONU. (11 de Enero de 2015). *Modelos de Consumo y Producción*. Obtenido de Organización de Naciones Unidas Sitio web: http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/energia_ni.htm
- OSINERGMIN. (2016). *La Industria de la Electricidad en el Perú*. Lima: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- Pavlostathis, S., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 21(5-6) 411-490.
- Pazmiño, A. (Diciembre de 2012). *Diseño, Construcción e Implantación de un Digestor Anaerobio de Flujo Continuo para el Tratamiento de Estiércol Bovino en la Finca "Rancho Santa Esther" del Sector "La Delicia" Parroquia Tulcán, Cantón Tulcán, Provincia del Carchi, Ecuador*. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- Pazmiño, K. (2016). *Biodigestores una solución energética para la población rural. Uso del biogás en un caso de estudio*. Tesis de Maestría, Flacso Ecuador.
- Pedraza, C. (1986). Manejo y propiedades del estiércol del lechería. *IPA La Platina*, 56.
- Perez, J. (Marzo de 2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros*. Tesis. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- Perez, R. (2008). *El Lado Oscuro de la Ganadería*. *scielo*.
- Pérez-Gavilán, P., & Viniegra, G. (Sin fecha). Potencial del Uso del Estiércol en la Alimentación de los Bovinos. *Laboratorio de Biotecnología, Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM*, 242-243.

- Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., Gonzales, C., & Tristán, F. (Abril de 2012). Environmental regulations and impact of manure generated by livestock operations in some american countries. *Scielo*.
- Pinto, A., & Vargas, S. (2008). Efecto de los Abonos Orgánicos y Químicos en el Cultivo de Amaranto (*Amaranthus caudatus* L.). *Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales*, 26-28. Obtenido de Universidad Técnica.
- Quintero, M., & Rondón, Y. (2012). *Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del mucílago de café utilizando lodo estiércol de cerdo como inóculo*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de Universidad Industrial de Santander.
- Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B., & Williams, R. (2008). *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. California: Department of Biological and Agricultural Engineering University of California.
- Restrepo, J. (2001). Elaboración de abonos orgánicos fermentados y biofertilizantes foliares. *IICA, Costa Rica*, 19, 121pp.
- Rittmann, B., & McCarty, P. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*.
- Rivas, O., Faith, M., & Guillen, R. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, Vol. 23, N.º 1, Costa Rica, P. 39-46.
- Rivera, V. (02 de Mayo de 2010). Estudio Cinético de la Digestión Anaeróbica Termofílica de Pollinaza a Escala Piloto. Tesis de Maestría Ciencias en Bioprocesos. Instituto Técnico Nacional, La Laguna de Ticoman, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Rosenkranz, F., Chamy, R., & Lema, J. (Septiembre de 2013). Estudio del comportamiento en reactores anaerobios de tipo ASBR frente a compuestos de difícil degradación y/o efectores negativos. Chile, España.
- Saucedo, G. (2007). *DEGRADACIÓN Y ESTABILIZACIÓN ACELERADA DE RESIDUOS URBANOS (RSU) POR TRATAMIENTOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA UNIDAD IZTAPALAPA.

- SENASA. (2006). Manual de recolección y envío de muestras. *Sitio Argentino de Producción Animal*, 6-13.
- Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología del Perú. (04 de Abril de 2018). *Datos históricos*. Obtenido de http://www.senamhi.gob.pe/include_mapas/_dat_esta_tipo.php?estaciones=472AC278
- Severiche, C., Acevedo, R., & Jaimes, J. (2014). Minería de rellenos sanitarios como alternativa de gestión para residuos sólidos. *Scielo*.
- Sifuentes, E., Albuja, E., Contreras, S., León, C., Moreyra, J., & Santa María, J. (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Agraria y Ganadera 2015*. MINAGRI. Lima.
- Silvestre, G. (2015). ¿Por qué la fermentación oscura puede ser una alternativa sostenible para valorizar residuos? España.
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste.
- Solera del Río, R. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II.2*. España: Ediciones Parainfo S.A.
- Soria, M., Ferrara, R., & Etchevers, J. (2000). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Instituto tecnológico agropecuario*, 354-355 pp.
- Sosa, R., Chao, R., & Del Río, J. (1999). Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos del Tratamiento de Residuos Agrícolas con Producción de Biogás. *Revista Computarizada de Producción Porcina*, 11.
- Taleghani, G., & Kia, A. S. (2005). Technical-economic analysis of the Saveh biogas power plant. *ResearchGate*, 30(3), 441-446.
- Trinidad, A. (Sin fecha). *Utilización de estiércoles*. Montecillo: SAGARPA.
- Ukpai, P., & Nnabuchi, M. (2012). Comparative study of biogas production from cow dung, cow pea and cassava peeling using 45 litres biogas digester. *Pelagia Research Library*.
- USDA. (2001). Test Methods for the Examination of Composting and Compost. USA: USDA.
- Varnero, M. (1991). Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás. *Ministerio de Agricultura (FIA) - Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile*, 48 p.

- Varnero, M. (17 de Noviembre de 2011). *Manual de Biogas*. Obtenido de FAO:
<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Veeken, A., & Hamelers , B. (1999). Effect of temperature on hydrolisis rates of selected biowaste components. *Bioresource techonology*, 69(3), 249-254.

IX. ANEXOS

Anexo 1: Resultados de la caracterización de los estiércoles – LASPAF UNALM



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



**INFORME DE ANALISIS ESPECIAL DE
MATERIA ORGANICA**

SOLICITANTE : IGNACIO LUNA REYES

PROCEDENCIA : LIMA

MUESTRA DE : EXCRETAS

REFERENCIA : H.R. 57306

FACTURA : 024

FECHA : 25/01/17

Nº LAB	CLAVES	C %	N %	Relación C/N
018	Excretas ganado vacuno	36.65	1.69	21.69
019	Excretas ganado camélido	27.92	1.28	21.81
020	Excretas ganado equino	43.16	1.53	28.21



Sady García Bendezú
 Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
 Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Anexo 2: Cálculos de la relación C/N inicial de los estiércoles frescos del ganado vacuno, camélido y equino

La fórmula utilizada para realizar el cálculo de la relación C/N de los estiércoles fue la siguiente:

$$\text{Relación (C/N)} = \frac{\text{Ctotal de la muestra}}{\text{Ntotal de la muestra}}$$

- Relación C/N del estiércol de ganado vacuno

Datos:	Estiércol de ganado vacuno
Carbono total (%)	36.65
Nitrógeno total (%)	1.69

Relación C/N inicial

$$\text{C/N} = 0.3665 / 0.0169$$

$$\text{C/N} = 21.686$$

- Relación C/N del estiércol de ganado camélido

Datos:	Estiércol de ganado camélido
Carbono total (%)	27.92

Nitrógeno total (%)	1.28
---------------------	------

Relación C/N inicial
$C/N = 0.2792 / 0.0128$
$C/N = 21.813$

- Relación C/N del estiércol de ganado equino

Datos:	Estiércol de ganado equino
Carbono total (%)	43.16
Nitrógeno total (%)	1.53

Relación C/N inicial
$C/N = 0.4316 / 0.0153$
$C/N = 28.209$

Anexo 3: Cálculos de la cantidad de chala de maíz necesaria para elevar la relación c/n de los estiércoles hasta 30/1

La fórmula utilizada para realizar el cálculo de la cantidad de chala de maíz necesaria para elevar la relación C/N de los estiércoles fue la siguiente:

$$C/N = \frac{C1.X1 + C2.X2}{N1.X1 + N2.X2}$$

Donde:

C1= % carbono seco de chala de maíz

N1= % nitrógeno seco de chala de maíz

X1= peso chala de maíz seco (kg)

C2= % carbono seco del estiércol

N2= % nitrógeno seco del estiércol

X2= peso de estiércol seco (kg)

C/N= Relación C/N (30/1)

- Cantidad de rastrojos de maíz por kilogramo de estiércol de ganado vacuno

Datos:	Estiércol de ganado vacuno	Rastrojos de maíz
Carbono total (%)	36.65	39
Nitrógeno total (%)	1.69	0.7
Sólidos totales (%)	21	85

Relación C/N = 30

$$30 = \frac{0.39 * 0.85 * X1 + 0.3665 * 0.21 * 1 \text{ kg}}{0.007 * 0.85 * X1 + 0.0169 * 0.21 * 1 \text{ kg}}$$

X1 = 0.193 kg de chala de maíz por kilogramo de estiércol de ganado vacuno

- Cantidad de rastrojos de maíz por kilogramo de estiércol de ganado camélido

Datos:	Estiércol de ganado camélido	Chala de maíz
Carbono total (%)	27.92	39
Nitrógeno total (%)	1.28	0.7
Sólidos totales (%)	43	85

Relación C/N = 30

$$30 = \frac{0.39 * 0.85 * X1 + 0.2792 * 0.43 * 1 \text{ kg}}{0.007 * 0.85 * X1 + 0.0128 * 0.43 * 1 \text{ kg}}$$

X1 = 0.295 kg de chala de maíz por kilogramo de estiércol de ganado camélido

- Cantidad de rastrojos de maíz por kilogramo de estiércol de ganado equino

Datos:	Estiércol de ganado equino	Chala de maíz
Carbono total (%)	43.16	39
Nitrógeno total (%)	1.53	0.7
Sólidos totales (%)	25	85

Relación C/N = 30

$$30 = \frac{0.39 * 0.85 * X1 + 0.4316 * 0.25 * 1 \text{ kg}}{0.007 * 0.85 * X1 + 0.0153 * 0.25 * 1 \text{ kg}}$$

X1 = 0.045 kg de chala de maíz por kilogramo de estiércol de ganado equino

Anexo 4: Cálculo de los volúmenes de carga para los biodigestores

Las fórmulas utilizadas para realizar el cálculo de los volúmenes de carga para los biodigestores fueron los siguientes:

$$\text{Volumen gaseoso (VG)} = \text{Volumen total (VT)} * 0.25$$

$$\text{Volumen líquido (VL)} = \text{Volumen total (VT)} * 0.75$$

$$\text{Volumen líquido (VL)} = V_s + V_a$$

$$\text{Volumen sólidos (Vs)} = \text{VL} * 0.25$$

$$\text{Volumen agua (Va)} = \text{VL} * 0.75$$

$$\text{Volumen sólidos (Vs)} = V_{es} + V_{rm} + V_{lod}$$

$$\text{Volumen lodos (Vlod)} = V_s * 0.03$$

Donde:

V_s = Volumen de sólidos

V_{es} = Volumen de estiércol

V_{rm} = Volumen de rastrojos de maíz

V_{lod} = Volumen de lodos

- Volumen gaseoso (VG)

Datos:	Biodigestor
Volumen total (VT)	60 L

Volumen gaseoso (VG)

$$VG = 60 * 0.25$$

$$VG = 15 \text{ L}$$

- Volumen líquido (VL)

Datos:	Biodigestor
Volumen total (VT)	60 L

Volumen líquido (VL)

$$VL = 60 * 0.75$$

$$VL = 45 \text{ L}$$

- Volumen de sólidos (Vs)

Datos:	Biodigestor
Volumen líquido (VL)	45 L

Volumen de sólidos (Vs)

$$Vs = 45 * 0.25$$

$$Vs = 11.25 \text{ L}$$

- Volumen de agua (Va)

Datos:	Biodigestor
Volumen líquido (VL)	45 L

Volumen de agua (Va)

$$Va = 45 * 0.75$$

$$Va = 33.75 \text{ L}$$

- Volumen de lodos (Vlod)

Datos:	Biodigestor
Volumen de sólidos (Vs)	11.25 L

Volumen de lodos (Vlod)

$$Vlod = 11.25 * 0.03$$

$$Vlod = 0.3375 \text{ L}$$

- Volumen de estiércol (V_{es}) + volumen de rastrojos de maíz (V_{rm})

Datos:	Biodigestor
Volumen de sólidos (V_s)	11.25 L

$V_{es} + V_{rm}$

$$V_{es} + V_{rm} = 11.75 - 0.3355$$

$$V_{es} + V_{rm} = 10.9125 \text{ L}$$

Anexo 5: Cálculo de la cantidad específica de estiércol y rastrojos de maíz de la mezcla para conseguir una relación c/n de 30/1

- Proporción de estiércol de ganado vacuno + proporción de rastrojos de maíz

Datos:	Biodigestor
$V_{es} + V_{rm}$	10.9125 L

V_{es} vacuno y V_{rm}

$$10.9125 = V_{es} \text{ vacuno} + 0.193 V_{es} \text{ vacuno}$$

$$X = 9.1471 \text{ kg de excretas de ganado vacuno}$$

$$Y = 1.7654 \text{ kg de rastrojos de maíz}$$

- Proporción de estiércol camélido + proporción de rastrojos de maíz

Datos:	Biodigestor
Ves + Vrm	10.9125 L

Ves camélido y Vrm

$$10.9125 = \text{Ves camélido} + 0.295 \text{ Ves camélido}$$

X = 8.427 kg de excretas de ganado camélido

Y 2.486 kg de rastrojos de maíz

- Proporción de estiércol de ganado equino + proporción de rastrojos de maíz

Datos:	Biodigestor
Ves + Vrm	10.9125 L

Ves equino y Vrm

$$10.9125 = \text{Ves equino} + 0.045 \text{ Ves equino}$$

X = 10.4426 kg de excretas de ganado equino

Y 0.47 kg de rastrojos de maíz

Anexo 6: Cálculo de la concentración de sólidos totales de las mezclas de estiércol y rastrojos de maíz para cada tratamiento

La fórmula utilizada para realizar el cálculo de La concentración de sólidos totales de las mezclas de estiércol y rastrojos de maíz para cada tratamiento fue la siguiente:

$$Mc = \frac{X1.M1 + X2.M2}{X1 + X2}$$

Donde:

Mc= Concentración de sólidos secos en la mezcla

X1= Peso del estiércol

X2= Peso de la chala de maíz

M1= % de sólidos secos para el estiércol

M2= % de sólidos secos para la chala de maíz

- Sólidos totales (%) de la mezcla estiércol de ganado vacuno y rastrojos de maíz

Datos	Estiércol de ganado vacuno	Rastrojos de maíz
Concentración de sólidos secos (%)	21	85

Sólidos totales (%)

$$Mc = \frac{1 \text{ kg} * 0.21 + 0.193 \text{ kg} * 0.85}{1 \text{ kg} + 0.193 \text{ kg}}$$

Mc = 31.4 % de sólidos es lo que contiene la mezcla de estiércol de ganado vacuno y rastrojos de maíz.

- Sólidos totales (%) de a mezcla estiércol camélido y rastrojos de maíz

Datos	Estiércol camélido	Rastrojos de maíz
Concentración de sólidos secos (%)	43	85

Sólidos totales (%)

$$Mc = \frac{1 \text{ kg} * 0.43 + 0.295 \text{ kg} * 0.85}{1 \text{ kg} + 0.295 \text{ kg}}$$

Mc = 52,6 % de sólidos es lo que contiene la mezcla de estiércol de ganado camélido y rastrojos de maíz.

- Sólidos totales (%) de a mezcla estiércol equino y rastrojos de maíz

Datos	Estiércol de ganado equino	Rastrojos de maíz
Concentración de sólidos secos (%)	25	85

Sólidos totales (%)

$$Mc = \frac{1 \text{ kg} * 0.25 + 0.045 \text{ kg} * 0.85}{1 \text{ kg} + 0.045 \text{ kg}}$$

Mc = 27,6 % de sólidos es lo que contiene la mezcla de estiércol de ganado equino y rastrojos de maíz.

Anexo 7: Datos de temperatura registrados para cada tratamiento y sus repeticiones durante el desempeño de los biodigestores

Evaluación de la Temperatura (°C)											
Día	Hora	Trat. 1 (excretas vacunas)			Trat. 2 (excretas camelidas)			Trat. 3 (excretas equinas)			Temperatura ambiental promedio
		T1R1	T1R2	T1R3	T2R1	T2R2	T2R3	T3R1	T3R2	T3R3	
0	14:00	35.1	35.6	35.6	32.2	32.3	32.9	30.8	28.9	29.3	25.86
2	11:00	25.1	26.2	26.3	25.6	26.6	26.0	24.9	25.2	25.0	25.26
5	10:45	24.3	25.1	26.2	25.2	27.7	27.1	24.1	24.3	24.4	25.41
7	10:25	24.6	25.2	26.0	25.6	27.3	27.1	24.6	24.7	24.7	25.59
9	11:15	26.1	26.1	27.6	27.1	30.1	28.9	25.3	25.6	25.8	24.94
12	10:00	26.2	26.8	27.3	27.2	27.7	27.2	26.3	26.9	26.5	26.57
14	10:00	26.1	26.7	27.2	27	27.8	27.2	26.1	26.5	26.3	25.93
16	12:00	27.1	28.3	31.0	31.5	34.9	35.1	30.3	27.8	33.3	26.54
19	10:15	25.6	26.3	27.0	26.8	27.8	28.1	25.9	26.2	27.1	25.24
21	11:00	25.7	26.1	26.8	26.7	27.7	28.1	26.4	25.9	27.5	24.85
23	10:15	25.6	26.2	26.8	27.7	29.0	29.7	27.4	26.2	29.0	25.61
26	10:30	25.9	26.7	27.3	27.8	29.6	36.2	27.7	26.6	30.3	26.6
28	10:30	25.5	25.8	26.1	27.0	27.4	27.6	26.8	25.8	27.2	25.54
30	10:15	25.8	26.6	26.8	27.7	28.9	30.2	27.5	26.6	29.1	25.48
32	10:00	25.3	25.8	26.2	26.3	27.1	27.3	26.0	25.8	26.7	25.12
34	10:20	25.1	25.6	26.4	26.9	28.1	29.2	26.3	25.8	27.8	25.5
36	10:15	24.5	25.1	25.2	25.8	26.6	27.2	25.7	24.9	26.2	25.54
39	10:15	25.2	25.1	25.5	27.1	28.1	28.6	26.7	25.0	27.5	25.48
41	10:15	25.9	25.2	25.6	27.5	28.2	28.5	26.9	25.2	27.5	23.75
43	10:15	25.2	24.4	24.9	26.6	27.7	28.0	26.1	24.7	26.9	24.32
46	10:15	24.6	23.8	24.6	26.1	27.2	27.8	25.6	24.1	26.2	23.00
48	10:15	23.9	23.7	24.3	24.8	25.9	27	24.5	23.7	26.1	23.19
50	10:50	23.7	23.2	23.8	24.9	26.2	26.8	24.7	23.2	26.3	24.4
53	10:30	24.9	24.6	25.3	25.2	26.3	27.3	24.8	24.7	26.9	24.39
Promedio		25.72			27.74			26.24			25.14

Anexo 8: Datos de pH registrados para cada tratamiento y sus repeticiones durante el desempeño de los biodigestores

Evaluación del pH										
Día	Trat. 1 (excretas vacunas)			Trat. 2 (excretas camelidas)			Trat. 3 (excretas equinas)			Observaciones
	T1R1	T1R2	T1R3	T2R1	T2R2	T2R3	T3R1	T3R2	T3R3	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6.58	6.91	6.8	7.14	6.21	6.3	7.5	7.35	7.3	Se realizaron diluciones para medir el pH
5	6.7	7.1	6.7	6.4	6.3	6.1	7.2	7.3	6.9	Se realizaron diluciones para medir el pH
7	5.8	5.7	5.8	5.7	5.6	5.5	6.7	7	6.9	Se realizaron diluciones para medir el pH
9	5.3	5.6	5.5	5.3	5.4	5.5	6.3	6.2	6.2	-
12	5.5	5.8	5.6	5.4	5.4	5.4	6.4	6.3	6.3	-
14	5.4	5.8	5.6	5.3	5.3	5.2	6.3	6.3	6.4	-
16	5.8	6.2	6.0	5.6	5.6	5.5	6.8	6.7	6.9	-
19	6.0	6.4	6.2	5.7	5.9	5.8	7.1	6.9	7.1	-
21	6.2	6.8	6.6	6.2	6.3	6.4	7.4	7.1	7.0	-
23	6.3	6.8	6.9	6.5	6.8	6.8	7.5	7.2	7.1	-
26	6.6	6.9	7.0	6.7	6.9	6.8	7.1	7.2	7.1	-
28	6.9	7.2	7.1	6.9	7	6.9	7.2	7.2	6.8	-
30	6.9	6.9	7.1	6.7	7.1	7.0	7.3	7.3	7.1	-
32	7.0	6.9	7.0	6.8	7.1	7.2	7.7	7.5	6.9	-
34	6.8	7.0	7.0	6.9	7.2	7.1	7.3	7.3	7.0	-
36	6.8	7.1	7.0	7.1	7.1	7.1	7.2	7.3	7.1	-
39	6.7	6.9	6.9	7.0	7.0	7.1	7.1	7.3	7.1	-
41	6.9	7.0	6.9	7.0	7.1	7.1	7.2	7.3	7.1	-
43	7.0	7.0	7.0	7.1	7.2	7.1	7.2	7.2	7.1	-
46	7.0	7.0	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	-
48	7.1	7.1	7.1	7.0	7.1	7.2	7.2	7.1	7.1	-
50	7.0	7.1	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.1	7.1	-
53	7.0	7.2	7.2	7.1	7.1	7.2	7.2	7.1	7.1	-

Anexo 9: Datos de porcentaje de metano registrados para cada tratamiento y sus repeticiones durante el desempeño de los biodigestores

Día	Evaluación del % CH ₄									Observaciones
	Trat. 1 (excretas vacunas)			Trat. 2 (excretas camelidas)			Trat. 3 (excretas equinas)			
	T1R1	T1R2	T1R3	T2R1	T2R2	T2R3	T3R1	T3R2	T3R3	
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	24	40	10	11	23	8	26	28	21	
9	17	40	12	20	18	30	29	15	32	
12	29	58	25	29	20	17	31	29	33	
14	39	61	30	33	28	28	42	36	34	
16	48	58	39	41	36	39	42	39	37	
19	60	64	41	43	34	35	63	63	47	
21	57	63	46	32	34	42	50	32	28	
23	44	57	45	43	44	36	50	54	45	
26	47	61	53	58	40	36	49	54	55	
28	55	61	48	58	52	52	51	54	50	
30	45	58	46	38	56	54	48	50	50	
32	60	67	45	48	47	48	48	63	46	
34	47	56	35	39	39	39	39	51	44	
36	34	49	31	50	43	46	46	50	39	
39	46	66	37	54	45	41	46	51	44	
41	43	42	39	52	50	42	49	53	50	
43	46	50	42	50	51	47	48	50	49	
46	45	53	45	50	52	51	48	50	48	
48	48	57	47	52	50	46	45	47	46	
50	53	67	52	58	50	53	48	47	46	
53	50	63	44	55	46	42	51	49	48	

Anexo 10: Tratamiento estadístico de la variable porcentaje de metano en el biogás

- Análisis de varianza del contenido de metano en el biogás

ANOVA

Metano

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	908,233	2	454,116	3,438	,034
Within Groups	24569,651	186	132,095		
Total	25477,884	188			

- Prueba de Tukey y Duncan para comparación de medias

Metano

Tratamiento	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	
Tukey HSD ^a	dim Camélido	63	41,3333	
	ens Equino	63	44,5397	44,5397
	ion Vacuno	63		46,6667
	1 Sig.		,263	,553
Duncan ^a	dim Camélido	63	41,3333	
	ens Equino	63	44,5397	44,5397
	ion Vacuno	63		46,6667
	1 Sig.		,119	,300

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 63.000.

Anexo 11: Galería fotográfica



Estiércol de Ganado vacuno



Estiércol de ganado camélido



Estiércol de ganado equino



Biodigestores de 60 litros contruidos y utilizados



Conexión de la llave de salida del efluente y los termómetros



Mediación de la temperatura



Extracción del efluente de los biodigestores para registro de pH



Extracción del efluente de los biodigestores para registro de pH



Preparación de la solución utilizada para cuantificar el porcentaje de metano



Medición del porcentaje de metano en el biogás