

# FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Ambiental

“BIOGÁS A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DE  
LODOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES CON ESTIÉRCOL DE GANADO  
VACUNO DE LA CIUDAD DE TRUJILLO, 2020”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autores:

Liseth Julisa, Custodio Toledo

Janeth Roxana, Santos Campos

Asesor:

Ing. Jesús Alexander Sánchez González

Trujillo - Perú

2020

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicado a nuestros padres y hermanos pues ellos siempre fueron el motivo de seguir dando lo mejor de nosotras y sobre todo a nuestro Creador, quien fue nuestro guía y soporte en todo momento para poder culminar nuestra carrera exitosamente.

Como también a PRONABEC, por apoyarnos a lograr una de nuestras metas; ser profesionales.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por haber influido como guía y soporte en nuestra formación profesional, permitiéndonos culminar con éxito esta investigación.

A nuestros padres por su apoyo incondicional durante la ejecución de la presente investigación, **Digna Mercedes Toledo Guzmán, Santos Erbacio Custodio Tolentino, Melania Campos Medrano y Román Santos Fernández**, quienes nos fortalecieron anímicamente para continuar y culminar nuestra tesis.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) por brindarnos su apoyo; con prudentes consejos durante cinco (5) años para lograr uno de nuestros grandes sueños ser profesionales, con el fin de contribuir a nuestra sociedad para una mejoría continua de la misma.

A todos los docentes que impartieron con nosotros, sus conocimientos como también; valores para ser mejores profesionales cada día, de igual manera agradecer a aquellos amigos que siempre estuvieron apoyándonos en momentos buenos como malos.

Al Ingeniero Jesús Alexander Sánchez González, docente del Departamento de Ingeniería Ambiental, por su constante asesoría y consejos brindados durante la investigación.

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Realidad Problemática.....	12
1.2. Marco Normativo.....	47
1.3. Formulación del Problema.....	49
1.4. Objetivos.....	49
1.5. Hipótesis.....	50
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	50
2.1. Tipo de investigación.....	50
2.2. Población y muestra.....	50
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	50
2.4. Procedimiento.....	56
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	66
3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de ganado vacuno, lodo de Aguas Residuales (ARS) y la mezcla de ambos.....	66
3.2. Determinación de la producción de biogás.....	68
3.3. Determinación de la cinética de producción volumétrica de metano.....	70
3.4. Cálculo de la Actividad Metanogénica Específica de cada tratamiento.....	72
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	73
4.1. Discusión.....	73
4.2. Conclusiones.....	86
REFERENCIAS.....	88
ANEXOS.....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Variables, unidades, técnicas de medición e instrumentos de medición de los parámetros empleados.</i> .....	53
Tabla 2: <i>Ecuaciones empleadas para el cálculo de diferentes parámetros</i> .....	54
Tabla 3: <i>Formato para el registro de los volúmenes de biogás producidos en cada tratamiento (T1, T2 y T3)</i> .....	60
Tabla 4: <i>Pruebas individuales para cada muestra, estableciendo de la mezcla óptima para cada uno de los tratamientos adicionados con estiércol de ganado vacuno y el lodo de aguas residuales respectivamente.</i> .....	64
Tabla 5: <i>Resultado del análisis de la temperatura y pH de los residuos, durante la carga sólido de los biodigestores (T1, T2 y T3)</i> .....	67
Tabla 6: <i>Resultado del análisis de los parámetros químicos de los residuos para la carga sólido de los biodigestores (T1, T2 y T3)</i> .....	67
Tabla 7: <i>Registro de datos de la producción de biogás en cada tratamiento.</i> .....	68
Tabla 8: <i>Resultado de la velocidad específica, producción de DQO en metano, producción de metano por día (AME) y volumen teórico de metano en los reactores (T1, T2 y T3)</i> ....	73
Tabla 9: <i>Producción promedio de biogás en 10 días.</i> .....	112
Tabla 10: <i>Valores iniciales de pH en el T1, T2 y T3</i> .....	115
Tabla 11: <i>Descripción estadística del parámetro pH en el T1, T2 y T3</i> .....	115
Tabla 12: <i>Efecto multiplicador de 2.2 para el parámetro pH.</i> .....	116
Tabla 13: <i>Aplicación del Test Shapiro-Wilk al parámetro pH.</i> .....	116
Tabla 14: <i>Aplicación del Test- Kruskal Wallis debido a que el parámetro es no paramétrico.</i> .....	117
Tabla 15: <i>Valores iniciales de Temperatura en el T1, T2 y T3</i> .....	118
Tabla 16: <i>Descripción estadística del parámetro Temperatura en el T1, T2 y T3</i> .....	118

Tabla 17: <i>Efecto multiplicador de 2.2 para el parámetro Temperatura °C en cada tratamiento</i> .....	119
Tabla 18: <i>Aplicación del Test Shapiro-Wilk al parámetro Temperatura °C ya que es paramétrico</i> .....	119
Tabla 19: <i>Factor simple de ANOVA para el T1, T2 y T3.</i> .....	120
Tabla 20: <i>Valores iniciales tomados por triplicado de los parámetros pH y Temperatura °C.</i> .....	121
Tabla 21: <i>Análisis estadístico final de los parámetros pH y Temperatura °C</i> .....	121
Tabla 22: <i>Estadística descriptiva del Tratamiento 1.</i> .....	122
Tabla 23: <i>Estadística descriptiva del Tratamiento 2.</i> .....	123
Tabla 24: <i>Estadística descriptiva del Tratamiento 3.</i> .....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Fases de la digestión anaeróbica y poblaciones microbianas.....	25
<i>Figura 2:</i> Principales bacterias acidogénicas en digestión anaeróbica. ....	28
<i>Figura 3:</i> Principales bacterias homoacetogénicas identificadas en digestión anaeróbica .	29
<i>Figura 4:</i> Principales <i>Bacterias</i> y <i>Arqueas</i> detectadas en digestores anaeróbicos de biomasa vegetal operado en condiciones termofílicas y mesófilas .....	32
<i>Figura 5:</i> Composición genérica del biogás. Características generales del biogás.....	40
<i>Figura 6:</i> Composición típica de aguas residuales domésticas de la PTAR-COVICORTI	45
<i>Figura 7:</i> Composición del lodo fresco de las lagunas facultativas de Covicorti-Trujillo .	46
<i>Figura 8:</i> Caracterización de los lodos flotantes de las lagunas facultativas de la PTAR de Covicorti.....	46
<i>Figura 9:</i> Propiedades químicas de lodos residuales del PTAR COVICORTI. ....	47
<i>Figura 10:</i> Caracterización de la PTAR – COVICORTI.....	47
<i>Figura 11:</i> Montaje experimental de la Actividad metanogénica específica (AME). ....	59
<i>Figura 12:</i> Materiales empleados para la elaboración del montaje experimental AME.....	60
<i>Figura 13:</i> Factor de conversión de gramos de DQO a mililitros de CH <sub>4</sub> bajo diferentes temperaturas y a una presión de 1 atmosfera.....	66
<i>Figura 14:</i> Producción diaria de biogás durante. ....	69
<i>Figura 15:</i> Diferencia del promedio de la producción diaria de biogás.....	69
<i>Figura 16:</i> Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 1 (Estiércol de ganado vacuno +Agua residual). ....	70
<i>Figura 17:</i> Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 2 (Lodos PTAR +Agua residual). ....	71

*Figura 18:* Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos PTAR + Agua residual)..... 71

*Figura 19:* Volumen de metano acumulado producido en cada tratamiento empleando lodos de PTAR y estiércol de ganado vacuno durante 21 días. .... 112

*Figura 20:* Pendientes del volumen de metano acumulado producido en cada tratamiento empleando lodos de PTAR y estiércol de ganado vacuno. .... 113

*Figura 21:* Diagrama de las diferencias de pH en el T1, T2 y T3..... 117

*Figura 22:* Diagrama de las diferencias de Temperatura en el T1, T2 y T3. .... 119

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1: Porcentaje (%) de humedad.....</i>	55
<i>Ecuación 2: Porcentaje (%) de sólidos totales .....</i>	55
<i>Ecuación 3: Porcentaje (%) de sólidos volátiles.....</i>	55
<i>Ecuación 4: Porcentaje (%) de cenizas.....</i>	55
<i>Ecuación 5: Masa de sustrato empleado en el biodigestor.....</i>	55
<i>Ecuación 6: Porcentaje (%) de materia seca.....</i>	55
<i>Ecuación 7: Masa de la materia seca .....</i>	55
<i>Ecuación 8: Producción de DQO en metano .....</i>	55
<i>Ecuación 9: Masa de la Actividad Metanogénica Específica producido por día.....</i>	55
<i>Ecuación 10: Masa de la Demanda Química de Oxígeno del metano producido por día..</i>	55
<i>Ecuación 11: Producción acumulada de Biogás: curva de Gompertz .....</i>	56
<i>Ecuación 12: Raíz valores de desviación cuadrada.....</i>	56
<i>Ecuación 13: Normalizada RMSD (Error normalizado) .....</i>	56
<i>Ecuación 14: Modelo (Mmodel) en función de los valores experimentales (Mexperimental)</i> <i>.....</i>	56

## GLOSARIO

AME (Actividad Metanogénica Específica)

PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales)

EPS (Empresa Prestadores de Servicio)

SEDALIB (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de La Libertad Sociedad Anónima)

TRH (Tiempo de retención hidráulica)

DQO (Demanda química de oxígeno)

DBO (Demanda biológica de oxígeno)

SV (Sólidos volátiles)

ST (Sólidos totales)

AGVs (Ácidos Grasos Volátiles)

## RESUMEN

La presente investigación fue realizada con el objetivo para determinar la producción de biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020, siendo esta una alternativa del tratamiento y gestión de los biosólidos producidos en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), como también de los residuos pecuarios generados por la población ganadera. El trabajo siguió un proceso que consistió en tres etapas, la primera fue la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de los tres tratamientos para calcular las concentraciones que se empleará en cada biodigestor. La segunda, consistió en realizar el montaje del sistema AME (Actividad Metanogénica Específica) para la digestión anaeróbica del sustrato de cada tratamiento; finalmente se registró del volumen del biogás durante 21 días, llegando a generar un volumen acumulado mayor en T3 (Mezcla T1 y T2) de 3837.5 ml y un AME de 1.714 gDQO/g STV\*día, en comparación con la producción de biogás, utilizando lodos de PTAR (T2) y estiércol de ganado vacuno (T1). Cabe mencionar que los valores se convalidaron con el ajuste de un modelo sigmoideal Gompertz con un 99% de relación de producción de biogás y el tiempo.

**Palabras clave:** Biodigestión, Biogás, Lodos, Estiércol de ganado vacuno.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática

Hoy en día, las plantas de tratamiento de aguas residuales generan grandes masas de biosólidos convirtiéndose en una problemática a nivel mundial, ya que para su disposición se necesitan grandes cantidades de espacios o trasladarlos a lugares autorizados. Además, el entorno empleado puede ser alterado en su tiempo de vida útil y por la lixiviación generada (Limón, 2013, pág. 4). Los lodos se concentran sustancias responsables de características ofensivas (olores), patógenas y tóxicas que proceden del agua residual a tratar (Montes & Menéndez, 2010, pág. 103). Puesto que, su libre disposición y su inadecuado tratamiento hacen que se convierta en un foco infeccioso que genera el desarrollo de vectores y enfermedades para los seres humanos (Barrena, Gamarra, & Maicelo, 2010, pág. 87). Y afectan al medio ambiente, por su contenido de materia orgánica, microorganismos y metales pesados (Amador, Veliz & Bataller, 2015, pág. 1).

Por contraste, la intensificación de la producción ganadera, ha provocado un aumento en la generación de estiércol de vacuno, considerado como contaminante principal responsable de la generación de gases de efecto invernadero, por lo que se requiere una acción urgente para hacer frente a esta situación (Matthews, 2006).

En Latinoamérica el 70% de las aguas residuales generadas no son tratadas, por lo que son vertidas en fuentes naturales como ríos (Larios, González, & Morales, 2015, pág. 12); por otro lado, el tratamiento de las aguas residuales genera lodos, que como en el caso de Chile, los lodos con un alto contenido de humedad han sido dispuestos

en rellenos sanitarios, generando problemas en el funcionamiento de los rellenos, por su inestabilidad y por la generación de biogás y lixiviados (Henríquez, 2011, pág. 6).

En el Perú, recientemente en el año 2017 se aprobó el Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Decreto Supremo N° 014, 2017), sin embargo la implementación de este reglamento está aún pendiente y persiste la falta de lugares autorizados para la disposición final de lodos y residuos sólidos de las PTAR, además se han identificado PTAR que no cuentan con puntos de vertimiento, por lo que sus efluentes se podrían verter a terrenos aledaños causando lagunas y humedales de infiltración, causando efectos adversos en la capa freática (Méndez & Marchán, 2008, pág. 13-56).

En la provincia de Trujillo, la EPS SEDALIB S.A. trata un 52.98% aguas residuales, operando 08 plantas de tratamiento de forma deficiente, ya que no tienen puntos de vertimiento, licencias ni autorizaciones de funcionamiento por autoridades ambientales ocasionado un inadecuado manejo, operación y disposición de lodos generados en el tratamiento causando que estos se vuelvan más peligrosos, las PTAR se ubican en las localidades de El Porvenir, Trujillo, Víctor Larco, Florencia de Mora, Huanchaco, Moche y Salaverry (Decreto Supremo N° 015, 2017).

Mediante investigaciones realizadas por diversos autores manifiestan que a partir del aprovechamiento tanto de los residuos remanentes del tratamiento de aguas residuales y de los residuos de animales se puede obtener energía sostenible para beneficio de la sociedad. Una de las tecnologías empleadas para el manejo de los residuos orgánicos, es la digestión anaeróbica que disminuye las emisiones del efecto invernadero mediante la producción de biogás energético; así como biofertilizante (Sarabia, Laines, Sosa & Escalante, 2017, pág. 110).

En base a esta problemática el trabajo de investigación, tiene como objetivo determinar la producción biogás a partir de biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.

Así mismo para potenciar nuestra información se ha obtenido los siguientes

**antecedentes:**

El estudio realizado en España por García (2009) tuvo por objetivo seleccionar las condiciones de operación idóneas del proceso de codigestión anaerobia de estiércol y lodos de depuradora que optimicen la generación de biogás determinando el porcentaje de mezcla óptimo de estiércol y lodos a diferentes temperaturas, las mezclas ensayadas fueron las siguientes (todas expresadas en Volumen/Volumen): Mezcla 1: 25% Estiércol – 75% Lodos ; Mezcla 2: 50% Estiércol – 50% Lodos y Mezcla 3: 75% Estiércol – 25% Lodos; previamente a estas se les realizó una caracterización físico-química y los ensayos se realizó por duplicado. En este sentido, el porcentaje de mezcla más eficiente, en condiciones termofílicas, fue el correspondiente a la mezcla que contiene 25% v/v de Estiércol vacuno y 75% v/v de Lodos con una eliminación de 62% y 75,7% de DQO y COD y un tiempo de arranque de 12 a 22 días da que, a diferencia de mezcla en condiciones mesofílicas que tiene un tiempo de arranque de 12 a 19 días con resultados menores.

El estudio realizado en España por Buendía (2008) tuvo por objetivo tratar los residuos orgánicos generados en las industrias Castellanos-manchegas mediante tratamientos biológicos anaerobios que permitan la valorización de la materia orgánica prestando especial atención a la producción de metano. Para ello, se realizó la caracterización y codigestión de los residuos orgánico, resultando que la mezcla produce mayor cantidad de metano que al trabajarlo por separado, de los resultados

obtenidos, la velocidad máxima de consumo de DQO como la velocidad máxima de producción de CH<sub>4</sub>, lo obtuvo la mezcla de 50:50 (vinaza:lodo) en comparación a otras codigestiones realizadas, asimismo cabe mencionar que estiércol de vacuno, y los lodos pueden ser degradado en condiciones aerobias como anaerobias resultado ser el lodo con mayor degradabilidad.

El estudio realizado en Costa Rica por Rivas, Vargas & Guillén (2010) tuvo por finalidad desarrollar un sistema electrónico e inalámbrico de control y protección para la producción de biogás, ellos indican que los biodigestores son alternativa para producir energía limpia a partir de residuos orgánicos teniendo en cuenta la influencia de factores químicos, físicos y biológicos para acelerar la descomposición de materia orgánica para producir biogás ya que, que es de suma importancia porque la producción de biogás está ligado a la microbiota presente en el medio y el límite de metano producido a la composición del sustrato.

El estudio realizado en Chile por Vera, Ruigómez, González, Bodelón & Rodríguez (2014) han utilizado un biorreactor de membrana sumergida para tratar aguas residuales domesticas con el fin de definir las condiciones de filtración de las suspensiones generadas en el proceso. Esto ha conllevado a generar biogás con una composición de metano del 60% en 25 días a temperatura ambiente, además el comportamiento de filtración de los biorreactores en condiciones anaerobias o aerobias es similar en la fase estacionaria.

Este trabajo fue realizado en México por Rodríguez. R., Rodríguez. S., Monroy & Ramírez (2014) tuvieron como objetivo evaluar la digestión anaerobia de lixiviados de residuos sólidos mezclados con agua residuales las cuales permitieron mantener activo el reactor de flujo ascendente generando una remoción de DQO mayor al 90%

y un alto rendimiento de producción de metano que puede servir de energía para las propias comunidades.

El estudio realizado en México por Hernández, Sánchez, Béteau & Díaz (2014) tuvieron como finalidad ejecutar a escala de laboratorio para hacer un análisis de un reactor anaerobio agitado en el que se empleó aguas residuales para generar biogás con el fin de determinar el efecto de la inmovilización de bacterias en soportes sólidos, comparando variables hidrodinámicas del sustrato de entrada así como de las condiciones iniciales, hecho el análisis por los autores, se dice que el sustrato de entrada afecta la velocidad del proceso, los microorganismos llegan en poco tiempo a la fase estacionaria, además que el proceso de inmovilización causa mejoras en la digestión y el retrato de las fases es clave para manipular las variables indicadoras las cuales permiten elaborar estrategias de control para asegurar el desempeño del proceso.

El estudio realizado en México por Castro, Escalante, Gómez & Jiménez (2016) tuvo por objetivo evaluar la producción de metano de una mezcla de aguas residuales de sacrificio de bovino con estiércol de estos animales a temperaturas 37 °C y 30 °C, sus parámetros cinéticos fueron evaluados mediante una bondad de ajuste del modelo de Gompertz dando como resultado que no existe diferencias de producción de biogás a diferentes temperaturas, pero concluyeron que es óptimo utilizar las aguas residuales vertidas por la planta de sacrificio bovino y bufalino a una temperatura de 30 °C, ya que al hacer un análisis del sustrato al iniciar el proceso en el biodigestor contenía 7467 mg DQO/L produciendo 0,73 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV con un promedio de 31235 kWh/mes de energía eléctrica generada.

El estudio realizado en México por Sarabia, *et al.* (2017) compararon la digestión anaerobia de excretas de borrego con la codigestión anaerobia de mezclas de excretas de borrego con lodos de aguas residuales y excretas de borrego más rumen. En este sentido, se puede ver en este trabajo que la digestión de un solo sustrato genera mayor producción de biogás en comparación a las combinaciones, sin embargo, es el tratamiento que genera menor porcentaje de metano, por otro lado, la codigestión de excretas de borrego con lodos de aguas residuales es considerado el mejor, ya que presentó menor concentración de H<sub>2</sub>S y porque el empezó a generar biogás en el menor tiempo a comparación de los otros.

El estudio realizado en Bucaramanga-Colombia por Julio, Peláez & Molina (2016) hicieron monodigestiones y codigestiones anaerobias es decir diversas mezclas de lodos de aguas residuales con residuos alimenticios para generar biogás en reactores por lotes en condiciones mesofílicas, dando como resultado que la codigestión genera la más alta producción de metano dado que los residuos de alimentos proveen carbono orgánico a los lodos optimizado la producción de biogás y por ende mejorando la relación C/N.

En la investigación realizada en Bolivia por Rodríguez, Ventura, López & Pérez (2017) trabajaron con un reactor para producir biogás a partir de lodo fresco del tratamiento de aguas residuales en condiciones mesofílicas, el digestor fue operado a diferentes cargas de alimentación durante 20 días, de este estudio es evidente que si el digestor es operado con mayores cargas de biomasa, menor será el TRH y el sistema se volverá más estable asimismo, este tratamiento se convierte en un alternativa para el tratamiento excedente de lodos en las PTAR.

En la investigación realizada en Venezuela por López, Martínez, & Paredes (2016) hicieron un sistema automatizado para optimizar la digestión anaeróbica controlando pH, temperatura, y presión desde una computadora brindando datos precisos con el mínimo error, este sistema además de ser muy eficiente y práctico permitirá que si se presentase una anomalía se pueda corregirse a tiempo real.

El estudio realizado en Colombia por Sanabria, Duran & Gutiérrez (2012) cuantificaron la producción de biogás mediante un ensayo de AME con vinaza cruda mediante dos métodos el cromatográfico y por desplazamiento líquido el cual, genera la mayor producción de biogás respecto al otro método y puede deberse a la presencia de otros gases que al no reaccionar con el NaOH se acumulan, además los análisis estadísticos no muestran diferencias significativas de producción de CH<sub>4</sub>.

El estudio realizado en Colombia por Torres & Pérez (2010) mencionan que la AME sirve para cuantificar la producción volumétrica de metano de una manera más sencilla y práctica evaluando comportamientos mediante la biodegradación de diferentes sustratos, además esta metodología es empleada para la caracterización de lodos permitiendo optimizar las variables de la digestión anaerobia siendo una opción viable para la comparación de resultados.

El estudio realizado en Bogotá-Colombia por Torres & Chaparro (2015) estudiaron la AME de lodos del tratamiento de aguas residuales adicionadas con amoxicilina bajo agitación, los resultados arrojaron que la AME en lodos es alta, además se muestra que al aumentar la concentración de amoxicilina disminuye la producción de CH<sub>4</sub>, además los datos experimentales se ajustaron al modelo de Gompertz dando una buena predicción.

El estudio realizado en Venezuela por Anzola, Oliveira & Zaiat (2008) definen que la AME es una herramienta clave para monitorear el proceso biológico. Su finalidad de este estudio es evaluar el comportamiento de las Arqueas Metanogénicas de lodos en un reactor con presencia y ausencia de oxígeno de lecho fijo con recirculación líquida, los datos arrojados muestran que el oxígeno presente en el medio no inhibió el comportamiento metnogénico por lo contrario la producción de metano fue mayor respecto al reactor anaerobio debido a la presencia de bacterias facultativas las cuales sirven de barrera protectora para las bacterias anaerobias.

El estudio realizado en Colombia por Bolívar & Ramírez (2012) hicieron dos biodigestores para el tratamiento de excretas de porcino y de vacuno por separado para no tener inconvenientes en la producción de biogás en relación al C/N que presentan, esta es una muy buena alternativa ya que, permite disminuir el impacto ambiental a partir del aprovechamiento de residuos sólidos dado que, estos tratamientos generan una remoción del 60 al 90% de DQO y SV permitiendo suplir necesidades energéticas.

En el estudio realizado en Guadalajara-México por Coss y León, H., Del Campo, C., Loza, J., Durand, L., Monteros, E. & López, E. (2015) su objetivo fue mejorar la producción de biogás y fertilización del suelo empleando el sustrato de bovino; monitoreando el parámetro de pH durante el proceso de digestión anaeróbica en los biodigestores; tuvieron en cuenta al pH, ya que vararía el alimento de los microorganismos y por ende la tasa microbiana, que cumplen un rol principal en la producción de metano. En cuento a la conclusión del trabajo se demostró que, si hay una mejor digestión anaeróbica empleando sustrato de bovino, disminuyendo el tiempo en la producción de biogás.

El estudio realizado en México por Espinal, Olvera, Hernández & Morillón (2016) tienen como objetivo demostrar la diferencia de la codigestión del estiércol de ganado bovino y porcino para la obtención de energía eléctrica mediante la producción de biogás; para ello se realizaron análisis previos a los sustratos para emplear la cantidad correspondiente en cada biodigestor. Los autores concluyeron que tanto el sustrato del ganado de bovino como de porcino son capaces de producir suficiente energía eléctrica para un rancho; ello es fundamental para determinar las concentraciones del sustrato para la obtención de biogás, ya que depende de ello el incremento de la producción de biogás y por ende la energía eléctrica.

El estudio realizado en Cuba por Núñez (2016) su objetivo fue emplear una tecnología de biogestión anaeróbica empleando los residuales porcinos para la producción de biogás en una planta de biogás de cúpula fija; mediante una metodología para calcular las dimensiones del biodigestor con la finalidad de mejorar la calidad de producción de biogás; concluyendo que digestión anaeróbica se dará utilizando las excretas de porcino y orina, evitando la generación de contaminantes en el medio y optimizando la producción de biogás. Por lo tanto, es notable que muy aparte de mejorar la calidad del medio ambiental y la salud, podemos reducir la inversión económica empleados para servicios domésticos como luz y gas.

La investigación hecha en Lambayeque-Perú por Chonlón, (2016) su objetivo fue realizar una digestión de los residuos orgánicos ganaderos para satisfacer la demanda energética en el Caserío El Tambo, ya que la digestión anaeróbica es una alternativa de tecnología que podría cubrir la demanda del consumo de energía eléctrica del caserío. Concluye que, la nueva propuesta de tecnología para producir biogás con residuos sólidos ganaderos es beneficioso por la factibilidad de la inversión,

ya que se emplea como sustrato esencial las excretas de ganado vacuno. Por lo tanto, la implementación de las tecnologías para la producción de energía sostenible genera muchos beneficios como el desarrollo social del caserío y la mejora del entorno ambiental.

La investigación realizada en Lurigancho-Lima-Perú por Paúcar (2014) tiene por objetivo diferenciar la codigestión anaeróbica del estiércol de cordonazo alimentado con levante y postura de maíz; para la producción de del biogás y biol. Teniendo en cuenta que el uso de la tecnológica debe permitir reducir la carga microbiana y optimizar la producción de biogás y biol; tras analizar los parámetros fisicoquímicos del sustrato se concluyó que obtención de bigas en los seis biodigestores que se experimentó para cuantificar la calidad del biogás y biol, no fue buena, debido a que no superan la concentración de metano. Finalmente, hay que tener en cuenta que la calidad y velocidad de producción de biogás y biol va a depender principalmente de la temperatura, debido a que, si esta aumenta, la degradación de la materia orgánica será mayor.

Este trabajo fue realizado en Tacna-Perú por Salazar, Amusquivar, Llave & Rivesplata (2012) su objetivo fue monitorear la producción de biogás y biol en un biodigestor tipo manga de polietileno alimentado por excretas de ganado bovino; mediante el control del pH y temperatura. Concluyó que, los materiales empleados para la construcción del biodigestor fueron importantes, ya que se mantuvo la temperatura interna del sistema, mejorando la eficiencia del biodigestor, generando altas cantidades de biogás como también fertilizante (biol). Por lo tanto, es muy importante saber las condiciones térmicas que serán sometidos los sustratos que se emplearán en el biodigestor, ya que de ello dependerá la producción del biogás.

El estudio realizado en Lima-Perú por Valdez (2016) su objetivo fue evaluar la calidad de biogás y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa. Se empleó la metodología de caracterización de los restos de las excretas, su fermentación anaeróbica en biodigestores tipo batch y el análisis de la calidad del biol; el investigador concluye que, la digestión del T2 (estiércol de la zona de granja) obtuvo mayor producción de volumen de biogás y metano en comparación a los tratamientos T1 (mezcla de zona africana, sabana y felinario) y T3 (mezcla del T1 + T2), además se obtuvo fertilizantes líquidos, con una alta concentración de macronutrientes.

En el estudio realizado en Trujillo por Cedrón & Cribilleros (2017) su objetivo fue realizar un diagnóstico del sistema de tratamiento de aguas residuales en los distritos de Moche y Salaverry con la finalidad de proponer proyectos que permitan reaprovechar las aguas residuales produciendo biogás o compost. Se concluye, que Salaverry no cuenta con una PTAR, por ello, la propuesta de la nueva tecnología logrará la reducción de diferentes parámetros que servirá para el reúso de los lodos y/o aguas residuales con fines de riego agrícola, obtención de abono o biogás. Por ende, para la elección de una tecnología se debe tener en cuenta la caracterización del sustrato que se va a tratar, con el fin de optimizar los procesos.

El estudio realizado en el Complejo Arqueológico Huaca de la Luna-Trujillo-Perú por Padilla & Rivero (2016) tienen como objetivo estudiar tipo de biodigestor más eficiente para producir biogás y compost empleando como sustrato, los lodos y aguas residuales. Tras el análisis del sustrato, lodos ARS se empleó dos tipos de biodigestores uno de polietileno y otro de vidrio; concluyendo que el biodigestor de polietileno tiene mayor eficiencia en la producción de biogás como también de

compost, el cual es favorable para el uso agrícola, debido a las altas concentración de fosforo y potasio. Por lo tanto, la digestión anaerobia es una tecnología que se emplea para tratamiento de diferentes residuos orgánicos con el fin de obtener biogás que es utilizado como energía sostenible.

### **Justificación**

Una de las razones por la cual se está realizando esta tesis de investigación es por el inadecuado tratamiento y gestión de lodos del tratamiento de las aguas residuales como también de los residuos pecuarios, esta problemática se ve reflejada en muchas ciudades del Perú, debido a falta de interés de las autoridades provocando daños al medio ambiente como es contaminación atmosférica, a causa de las emisiones de gases originando el efecto invernadero. Es por ello, que la presente investigación tiene por finalidad producir biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno, como alternativa de solución para minimizar la materia orgánica contaminante, que no tienen tratamiento alguno.

El aprovechamiento sistematizado del estiércol de ganado vacuno como recurso orgánico puede desarrollarse como una alternativa de emprendimiento o negocio para ganaderos del campo y la ciudad, con el conocimiento correcto de mezclas de los deshechos para maximizar la producción de energía (biogás) y biofertilizantes. Siendo así, se mejorará la vida de los campesinos, la producción agrícola y sobre todo se preservará el ambiente (Barrena, Gamarra, & Maicelo, 2010, pág. 87).

Este trabajo de investigación servirá como guía para la elaboración de tesis posteriores, asimismo, permitirá conocer la capacidad generadora de biogás en mezclas de lodos municipales y estiércol de ganado vacuno para la producción de

energía (biogás), así como también de abrir una ventana para la producción de abono o fertilizante orgánico para el suelo, obtenido a partir de la biodigestión; ofreciendo soluciones a la problemática ambiental actual.

Para tener mejor soporte de esta investigación se tuvo en cuenta las siguientes

### **definiciones conceptuales:**

#### **A. Digestión anaeróbica**

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismo en ausencia de oxígeno con el fin de producir bigas compuesto de metano y dióxido de carbono, esto puede llevarse a cabo en cualquier lugar donde exista materia orgánica y el potencial redox sea bajo (Solera, Alvares, Aymerich, Bedmar, Carballa, Castrillón, Flotals, Front, Lopez, Marañon, Prenafeta, Tortosa, & Vicent, 2014, pág. 17).

También llamada biometización, y puede ser generada a partir de residuos agrícolas, ganaderos, lodos residuales y a partir de la fracción de residuos sólidos urbanos (Barberá, 2011, pág. 60). Este proceso tendrá una duración estimada de 20 a 60 días y va depender de la temperatura mientras más se acerque a 35 °C mejor será la producción de biogás (Barrena, Gamarra, & Maicelo, 2010, pág. 87).

El proceso de digestión anaeróbica es realizado por un conjunto de microorganismos con metabolismos diferentes, dividida en cuatro fases muy diferenciadas: Hidrólisis, acidogénesis, acidogénesis y metanogénesis (*Figura 1*).

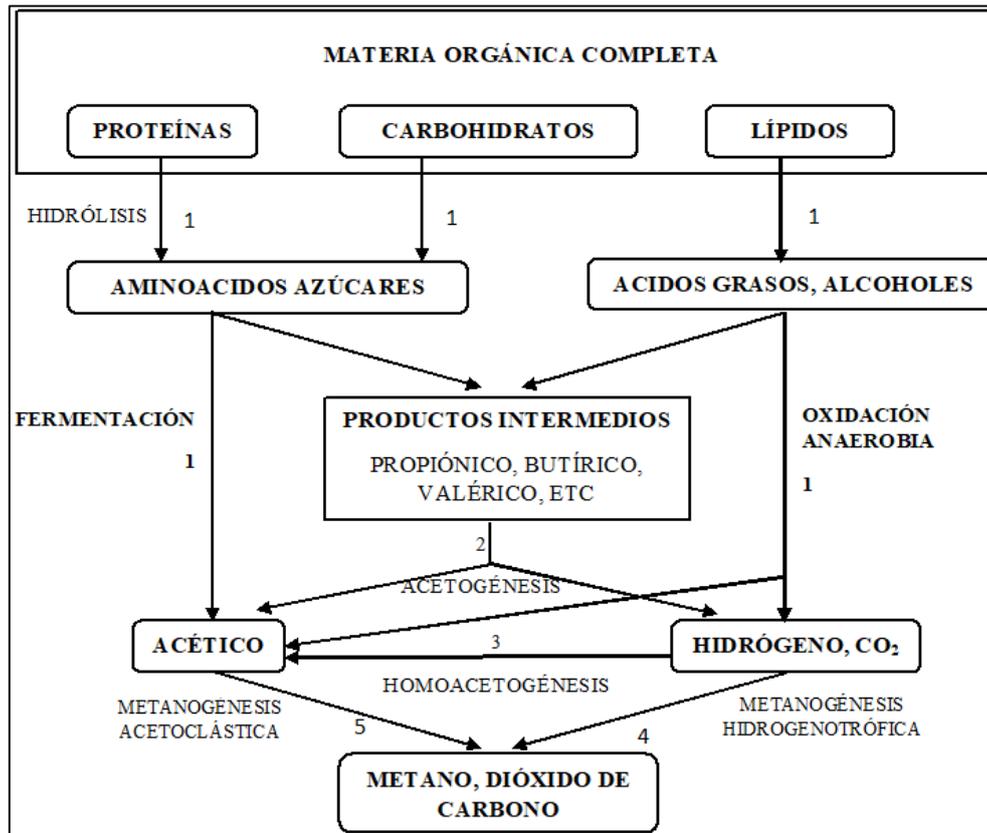


Figura 1: Fases de la digestión anaeróbica y poblaciones microbianas; 1) bacterias hidrolíticas acidogénicas; 2) bacterias acetogénicas; 3) bacterias homoacetogénicas; 4) arqueas metanógenas hidrogenotróficas; 5) arqueas metanógenas acetoclásticas (Solera, *et al.* 2014).

Es necesario resaltar, que la digestión anaeróbica pasa por dos fases una alcalina y la otra acida, las cuales distinguen la importancia y el control del pH. En ambas fermentaciones tanto acida como alcalina; el sustrato es complejo en carbohidratos, grasas y proteínas; que juntamente con los microorganismos potenciales formadores de ácidos (saprofílicos facultativos) que producen degradaciones intermediarias y estas a su vez productos celulares. Las reacciones que se dan en el proceso de la digestión anaeróbica son expresadas en fermentación alcalina y acida: Fangos frescos + Microorganismos "A" →  $CO_2H_2O$  + Ácidos orgánicos (**Fermentación ácida**) y Fangos frescos + Microorganismos "A" →  $CH_4 + CO_2 +$  Ácidos orgánico (**Fermentación alcalina**) (Hernández, 2015).

## Fases del proceso de digestión anaeróbica

### Hidrólisis

Las bacterias hidrolíticas realizan metabolismo celular mediante enzimas extracelulares las cuales solubilizan polímeros, son anaerobios estrictos y facultativos y tienen un proceso lento dentro de ellas se tiene, por ejemplo: *clostridium* y la *Rominococcus* (Solera, *et al.* 2014, pág. 27).

Es un proceso de transformación de moléculas grandes a moléculas pequeñas mediante la acción enzimática extracelular de microorganismos, fundamentalmente por bacterias fermentativas, puede darse en la materia particulada como en la materia soluble. Cabe mencionar, que este proceso puede convertirse en limitante de velocidad (Ferrer & Seco, 2017, pág. 112). Debido a que la hidrólisis de la biomasa se ve limitada por la accesibilidad restringida de las enzimas extracelulares d las bacterias hidrolizables hacia los polímeros intracelulares ya que, estos están protegidos por membranas celulares (Barrena, Gamarra, & Maicelo, 2010, pág. 87).

El sustrato orgánico está compuesto por macromoléculas de hidratos de carbono, proteínas, lípidos y material lignocelulósico, y dicha hidrólisis es realizada por distintos grupos enzimáticos. Los azúcares son hidrolizados por las amilasas y las gluco-amilasas en glucosas, las proteínas por proteasas en proteasas, peptonas, péptidos y aminoácidos, los lípidos por las lipasas generando ácidos grasos de cadena larga y moléculas como glicerol y la hidrólisis del material lignocelulósico produce celobiosa y glucosa, asimismo, la hemicelulosa produce pentosas hexosas y ácidos urónicos. A diferencia de la lignina que es un material refractario a la degradación anaerobia (Solera, *et al.* 2014, pág. 19).

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso estará ligado al tamaño de partículas, tipo de materia orgánica, concentración de biomasa hidrolítica y factores ambientales como el pH y Temperatura (Solera, *et al.* 2014, pág. 19).

### **Fermentación o acidogénesis**

Las bacterias acidogénicas tienen un metabolismo fermentativo conformado por un grupo heterogéneo, productoras de ácidos orgánicos, dióxido de carbono e hidrógeno, son anaerobios estrictos y facultativos y tienen un proceso lento dentro de ellas se tiene, por ejemplo: clostridium y la Propionibacterium (Solera, *et al.* 2014, pág. 32).

Es un proceso de transformación de materia orgánica compuestas por moléculas pequeñas, fundamentalmente disuelta en ácidos volátiles de cadena corta como: acético, propiónico y butírico también en gases como H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (Ferrer & Seco, 2017, pág. 112).

La actividad de algunas bacterias acidogénicas depende de la concentración H<sub>2</sub> en el medio siendo posible solamente a valores muy bajos de presión (10<sup>-4</sup> -10<sup>-5</sup> atm). En este sentido, la eliminación constante de H<sub>2</sub> mediante la oxidación de CO<sub>2</sub> (Arqueas metanogénicas hidrogenotróficas) estimula la acción de las bacterias fermentativas para reducir los niveles de H<sub>2</sub>. Cabe resaltar, en esta fase que los inhibidores más destacados son los ácidos grasos de cadena larga (Solera, *et al.* 2014, pág. 20).

Las bacterias fermentativas consideradas también primarias; tiene un metabolismo.

Género	Clasificación taxonómica (Pylum/Clase)	Productos de fermentación
Acetobacter	Proteobacteria, Alfaproteobacteria	Ácido acético, CO <sub>2</sub>
Clostridium	Firmicutes, Clostridia	Acido butírico, CO <sub>2</sub>
Lactobacillus	Firmicutes, Bacilli	Ácido láctico, CO <sub>2</sub>
Clostridium	Firmicutes, Clostridia	Ácido propiónico, CO <sub>2</sub>
ruminococaceae	Firmicutes, Clostridia	Ácido caproico, CO <sub>2</sub>
*Familia		

Figura 2: Principales bacterias acidogénicas en digestión anaeróbica (Solera, *et al.* 2014).

### Acetogénesis

Las bacterias acidogénicas son anaerobios estrictos, tienen un metabolismo energético conformado por un grupo heterogéneo productoras de acetato dentro de ellas se tiene, por ejemplo: clostridium aceticum y la acetobacter woodii Propionibacterium (Solera, *et al.* 2014, pág. 34).

En esta fase se convierte los productos de resultantes de la acidogénesis en acetato por las bacterias acetogénicas sintróficas mediante dos rutas deshidrogenación acetogénica (producen acetato a partir de la fermentación de ácidos grasos volátiles, lactato, propanito y alcoholes) e hidrogenación acetogénica (las bacterias homoacetogénicas sintetizan el acetato a partir de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>). Es necesario mencionar, que las bacterias encargadas de este proceso dependen de la transferencia de H<sub>2</sub> entre diferentes microorganismos ya que no tienen otras posibilidades metabólicas. Es por ello, que el H<sub>2</sub> consumido sea a una velocidad igual o superior a que es producido (Solera, *et al.* 2014, pág. 20).

Phylum/Clase	Especies
<b>Firmicutes / Clostridia</b>	Acetobacterium woodii, Clostridium aceticum, C. formioaceticum, C. magnum, C. ultunense, C. scatologenes, Tepidanaerobacter acetatoxydans, Syntrophoaceticus schinkii, Thermacetogenium phaneum, Thermoanaerobacter kivui, Eubacterium limosum, Ruminococcus productus, Moorella thermoacetica, Sporomusa termitida.
<b>Spirochaetes / Spirochaetes</b>	Treponema primitia

Figura 3: Principales bacterias homoacetogénicas identificadas en digestión anaeróbica (Solera, *et al.* 2014).

## Metanogénesis

Las bacterias acidogénicas son anaerobios estrictos, tienen un metabolismo energético, productoras de metano dentro de ellas se tiene al dominio Archaea-Phylum Euryarchaeota (Solera, *et al.* 2014).

Las bacterias encargadas de eliminar los productos de las etapas anteriores y la formación del CH<sub>4</sub> son las arqueas metanogénicas. En esta fase se establecen dos grupos de arqueas metanógenas: arqueas metanógenas hidrogenotróficas (consumen H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H-COOH) y arqueas metanógenas acetoclásticas (consumen acetato, metanol y algunas melaminas). Entre los inhibidores más conocidos se encuentra los ácidos grasos volátiles, algunos cationes. Hay que tener en cuenta, que los microorganismos metanogénicos son estrictos, por ende, el oxígeno molecular es tóxico para ellos, así como, los nitratos pueden inhibir su crecimiento (Solera, *et al.* 2014, pág. 20-21).

## Poblaciones microbianas implicadas en la digestión anaerobia

Están integradas por una compleja comunidad de microorganismos anaerobios estrictos y facultativos de los dominios *Bacteria* y *Archaea* ambos con organización procariota. Las bacterias (*Bacteria*) están presentes en todos los procesos excepto en la metanogénesis. Mientras que, las arqueas (*Archaea*) juegan un papel clave y son las únicas responsables de la producción de metano. No obstante, el dominio Eukarya (hongos y levaduras) no se encuentran dentro de los biodigestores anaeróbicos, dicho

dominio representa 0.8 % del total del microbiota en la codigestión anaerobia de residuos municipales y biosólidos. Ahora bien, hay que tener presente que muchas levaduras tienen metabolismo anaerobio, como los hongos microaerófilos y anaerobios los cuales transforman la materia orgánica en el tracto gastrointestinal de herbívoros rumiantes y no rumiantes. Estos hongos anaerobios, clasificados en el phylum Neocallimastigomycota se han detectado en el rumen, intestino distal y heces de dichos animales es por eso que, en ciertos trabajos que se han inoculado hongos anaerobios del rumen o de las heces de animales (bioaumentación) en biodigestores han ocasionado que dichos microorganismos generen un incremento en la producción de metano, pero desaparecen rápidamente durante la digestión (Solera, *et al.* 2014, pág. 36).

En digestores anaerobios se presencia principalmente los phyla Bacteroidetes, Chloroflexi, Firmicutes, Actinobacteria y Proteobacteria pertenecientes al dominio Bacteria así como también phyla Acidobacteria, Chlorobi, Deinococcus-Thermus, Fibrobacteres, Planctomycetes, Synergistetes, Spirochaetes, Tenericutes y Thermotogae y con respecto a las arqueas, pertenecen a dos clases del phylum Euryarchaeota (Solera, *et al.* 2014, pág. 22).

## **Factores físicos y químicos que influyen en la digestión anaerobia**

### **El tiempo y la temperatura**

La temperatura condiciona el tiempo del proceso de la digestión anaeróbica, para una mejor producción se considera una temperatura de 35 °C para mantener la actividad de las bacterias mesófilas, ya que al exceder inhibe el proceso anaerobio (Hernández, 2015, pág. 958).

Se considera mesofílico cuando los microorganismos se desarrollan entre un rango de 25 a 45 °C; sin embargo, los mejores rendimientos se obtienen entre 30 y 38°C, el cual es más usado en el diseño del digester y caracterizado por tener mayor eficiencia energética que el régimen termófilo. Puesto que, las bacterias termofílicas se desarrollan en una temperatura de 45°C a 60 °C, con un óptimo rendimiento de 55°C y 60°C superando al rendimiento mesofílico, considerando tiempos de retención simples y un balance energético desfavorable. Además, de los Psicrófilicos, sus condiciones de temperatura esta entre un rango de 18 a 25°C, este intervalo es muy bajo, por ende, los tiempos de retención son muy elevados, desfavoreciendo el proceso anaeróbico (Fernández, *et al.* 2015, pág. 322-323).

Los microorganismos anaerobios que crecen y se reproducen entre una temperatura de 25°C y 45°C son de tipo de mesofílico, donde se desarrollan los *Clostridium spp*, *Methanococcus spp* y *Methanobacterium spp*. Además, en un rango de pH 5.5 y 8.0 se desarrollan microorganismos de tipo Neutrófilos, los cuales son: *Clostridium perfringes*, *Methanococcus spp*, *Methanobacterium spp* y *Propionibacterium acidipropionici*. Las bacterias anaeróbicas que participan en la fase hidrólisis y acidogénesis; con una temperatura mesofílico (25°C – 45°C) y un rango de pH Neutrófilo (pH 5.5-8.0) se encuentran los siguientes microorganismos: *Clostridium* y *Propionibacterium* (Corrales, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015, pág. 58, 59, 60).

Por otra parte, las emisiones de metano a la atmósfera varían de acuerdo a la temperatura media anual, en caso de almacenamiento de vacuno los valores son los siguientes: 71% (porcentaje) de metano a una temperatura de 26 °C. El control de la

temperatura interna es muy importante en la velocidad de descomposición de la materia (Solera, *et al.* 2014, pág. 152).

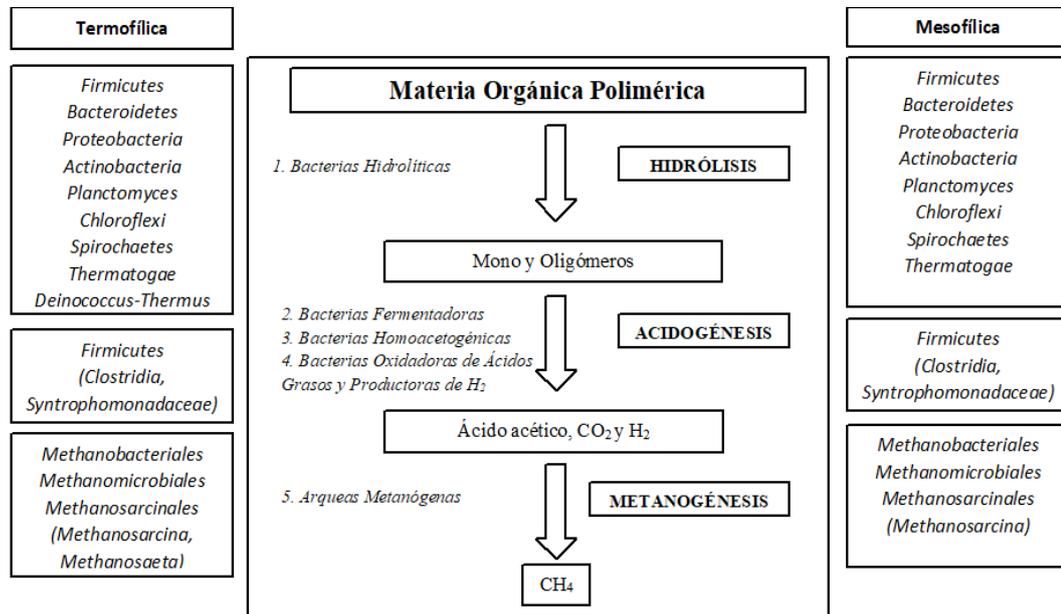


Figura 4: Diferencias y funcionalidad dependiente de la temperatura de operación (Solera, *et al.* 2014).

## pH

Las bacterias metano-génicas son muy sensibles al pH ocasionando disminución en su crecimiento por lo que, el intervalo adecuado para los procesos anaerobios debe estar entre 6-8 (Ferrer & Seco, 2017, pág. 118).

## Relación C/N

La relación de carbono y nitrógeno adecuada teóricamente es de 25-35, es por ello, fundamental que exista una relación equilibrada de estos elementos en la materia orgánica. Puesto que, si es elevada disminuye la actividad biológica y si esta es muy baja conlleva a un exceso de nitrógeno que se pierde en forma de amoníaco (Barberá, 2011, pág. 90).

## Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Representa el tiempo de residencia del líquido en el interior del biodigestor, si el rendimiento del digestor es mayor, el tiempo de retención también aumentará; además se verá limitado por el tamaño del digestor. La tecnología no favorece digestión cuando la retención de la biomasa se da durante un mayor tiempo del líquido que la contiene, hay que tener en cuenta que el tiempo de retención del líquido y de la biomasa son idénticos en el proceso anaeróbico. Si la tecnología cumple con la siguiente relación  $TRB > TRH$  es porque se han incluido sistemas de retención de biomasa. (Fernández, *et al.* 2015, pág. 324).

### **Tasa de materia orgánica**

Este es un parámetro muy importante para el diseño del digestor, ya que al sobrecargarlo la producción de gas puede fracasar, por la falta de capacidad de degradar la materia orgánica. El sustrato expresado como sólidos totales o volátiles representará cuantos metros cúbicos diarios se alimentará el digestor. Además, hay que tener en cuenta que las tecnologías de digestión anaeróbica serán afectadas sino lograra trabajar en el intervalo de tasa de carga orgánica, el cual implica estar también expresada en DQO o DBO, y esta a su vez a Kilogramos (Kg) (Fernández, *et al.* 2015, pág. 325).

### **Tiempo u edad del sustrato**

La potencialidad de producción de biogás también depende del tiempo de almacenamiento del sustrato antes de la digestión anaeróbica (Hernández, *et al.* 2014, pág. 153), este factor puede tener un efecto negativo en el proceso anaeróbico, a través de un análisis experimental se comprobó que, al aumentar el tiempo de almacenaje

previo, se reducirá la eficiencia de la separación sólido líquido por ende la producción de biogás (Solera, *et al.* 2014, pág. 153).

### **Comportamiento específico de las baterías productoras de metano**

Las bacterias metánicas se desarrollan lentamente y son sensibles a cambios bruscos del medio, ya que toleran un pH óptimo neutro de 7 o entre 6,5 a 7,6. Además, las bacterias en función del tiempo y la temperatura, son algunas de las especies que se reproducen en cuatro días a una temperatura de 35 °C. Y es así como se produce gas metano en una reacción exotérmica siendo rico energéticamente (Hernández, 2015, pág. 956).

### **Contenido de sólidos volátiles**

Este es otro de los parámetros más importantes para la producción de biogás, son los sólidos volátiles o DQO, el cual nos permite determinar el contenido de materia orgánica expresada en una relación SV/ST donde se indica la fracción de sólidos asimilables a materia orgánica. Los elevados tiempos de almacenamiento de estiércoles supone la volatilización de los compuestos orgánicos reduciendo posteriormente el proceso anaeróbico para la producción de biogás o desnitrificación; así mismo la reducción de materia orgánica biodegradable se traduce en la reducción de la relación DQO/SV (Solera, *et al.* 2014, pág. 146).

Tomado como referencia las características de las deyecciones de ganado; con respecto a concentraciones que presenta, el vacuno una concentración de 90.2 kg SV/Tm de sólidos volátiles y puede llegar a producir 27.2 m<sup>3</sup> biogás/Tm; además el biogás obtenido contiene un 65% de metano (Solera, *et al.* 2014, pág. 153).

### **Elevado contenido de agua**

El biodigestor debe tener un contenido de mezcla suficiente para alimentarlo, siendo ello el principal factor que permite a las bacterias y otros microorganismos producir biogás. Si la mezcla está muy diluida habrá poca materia orgánica y por ende baja o limitada producción de biogás (Marichal, 2010, pág. 28).

En caso de las deyecciones ganado, la humedad supera fácilmente el 90%, teniendo una baja concentración de ST, este criterio se emplea habitualmente para la diferencia del estiércol, el contenido bajo de ST se convierte en un limitante para el transporte y exportación que conlleva a un aumento de costes de transporte (Solera, *et al.* 2014, pág. 146). Y, por ende, implica que la biomasa deberá de adquirir un inóculo adicional para la productividad eficaz del biogás.

### **Potencial redox**

Los microorganismos anaeróbicos archaea metanogénicos en un rango óptimo de la potencia REDOX entre -300 y -330 mV, permiten la producción de metano. Si el rango es mayor, entonces el proceso en el reactor disminuye; ya que la organización de los microorganismos se ve alterada por la existencia de los gránulos anaeróbicos. La estructura de estos agregados está separada por capas: los metanogénicos se encuentran en la capa central, los acidogénicos en la capa intermedia y los hidrolíticos en la capa exterior. La formación de los gránulos está en la pared interna del reactor, y permite el aislamiento de los metanogénicas ante el oxígeno disuelto del fluido (Fernández, *et al.*, 2015, pág. 323).

### **Rango amplio de variabilidad en la composición y caracterización**

La aplicación de la dosis óptima de sustrato en la digestión anaeróbica, es debido a la caracterización general de las deyecciones que se empleará, ya que la

mezcla óptima influye en muchos de los factores de la producción de biogás; es por ello que se realiza un seguimiento permanente de monitoreo (Solera, *et al.* 2014, pág. 146).

### **Mezcla**

Para una dosis óptima es necesaria que la materia sólida sea elevada, debido a que es un componente muy importante para la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, ya que dependerá mucho de las condiciones de la mezcla establecida en los digestores. Además, la distribución homogénea de enzimas y microorganismos en el digestor se debe a la buena mezcla durante un determinado tiempo (Solera, *et al.* 2014, pág. 121). Por otro lado, la agitación implica la reducción del tamaño de las partículas durante el proceso de la digestión, eliminando el biogás de la mezcla. La importancia de implementar un sistema de mezcla óptima es para evitar los problemas en la zona superior de los digestores la estratificación y formación de sólidos flotantes (Solera, *et al.* 2014, pág. 121).

La carga del sustrato en un biodigestor tiene una relación de 1: 4 (estiércol más agua), el cual es denominada carga diaria. Con respecto al volumen total del digestor el 75% lo compone la fase líquida; aquí están presentes las bacterias que degradarán la materia orgánica en un tiempo determinado; el 25% lo conforma la fase gaseosa por la situación anaeróbica donde se producirá biogás y acumulará en la parte superior, el volumen gaseoso equivale a un tercio del volumen líquido (Martí, 2008, pág. 29).

### **Nutrientes e inhibidores**

La relación que deberá de existir entre la masa de carbono y nitrógeno (C/N) es fundamental para el desarrollo óptimo de los microorganismos metanogénicos que oscilan entre un rango de 20 y 30. Cabe resaltar que en la primera fase los

microorganismos son menos exigentes a sus demandas, por ello se desarrollan con una relación de 10 a 45 (Fernández, *et al.* 2015, pág. 325-326). La relación óptima comprende entre 20:1 y 30:1, cuyos valores representan altos rendimientos.

En cuestión a la relación de nitrógeno y fósforo (N/P), según Fernández da a conocer que lo adecuado sería entre un valor de 4 a 5 (2015). Si la digestión anaeróbica tiene un bajo rendimiento, será necesario comprobar la disponibilidad del microelemento en el medio, ya que resulta ser difícil establecer concentraciones óptimas de microelementos. Además, las altas concentraciones de variaciones de compuestos orgánicos pueden resultar inhibidores para el proceso de la digestión anaeróbica (Fernández, *et al.* 2015, pág. 325-326).

Otro de los parámetros más importantes de las deyecciones de ganado es el nitrógeno, ya que es el principal nutriente y limitante para su aplicación agrícola. Cabe resaltar que el 75% de nitrógeno total presente en el estiércol de bovino, son altamente contaminantes para el medio del suelo, agua y atmósfera, ya que el porcentaje de nitrógeno total representa el nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>) (Solera, *et al.* 2014, pág. 147).

Otro de los nutrientes del estiércol son el fósforo (P) y potasio (K), donde el K está presente en la orina del animal (sales minerales) mientras que el P se encuentra de forma inorgánica. El P y N establecen una relación P/N más elevada que el usual consumo de los cultivos, permitiéndonos utilizarlo como fertilizante. Si utilizamos el N como criterio de dosificación generara la sobrefertilización de P causando la contaminación del suelo (Solera, *et al.* 2014, pág. 147).

Los inhibidores pueden estar ya presentes en el sustrato o ser generados durante el proceso de digestión anaerobia.

### **Amoniaco (NH<sub>3</sub>)**

Producto de la degradación anaerobia de compuestos nitrogenados de proteínas y urea presentándose como amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y amoniaco (NH<sub>3</sub>) siendo este último muy tóxico por su capacidad de atravesar la membrana celular y causar un desequilibrio de protones y deficiencia de potasio (Solera, *et al.* 2014, pág. 64).

### **Sulfuro**

Este compuesto se encuentra en aguas residuales y residuos sólidos, es usado como aceptor de electrones por las bacterias reductoras de sulfato y transformado en sulfuro. La inhibición se da mediante, una inhibición primaria, causada por la competición por los sustratos orgánicos a oxidar (alcoholes, ácidos orgánicos, compuestos aromáticos, ácidos grasos de cadena larga), e inhibición secundaria, causada por la toxicidad del sulfuro sobre los microorganismos. La inhibición primaria depende de la relación DQO/S O<sub>4</sub>, la toxicidad del sulfuro, la proporción relativa de bacterias reductoras de sulfato y de microorganismos fermentativos, acetogénicos y metanogénicos y de la temperatura. Respecto a, la inhibición secundaria, la forma no disociada (H<sub>2</sub>S) es tóxica para los microorganismos metanogénicos como para las bacterias reductoras de sulfato (Solera, *et al.* 2014, pág. 65).

### **Hidrógeno**

Producto intermedio de la digestión anaerobia, formado en la (acidogénesis, acetogénesis) y se consume (metanogénesis, reducción de sulfato, formación de

acetato) durante el proceso anaerobio. La acetogénesis sólo tiene lugar si el  $H_2$  no se acumula en el medio siendo este el factor limitante. Por lo tanto, para que un digestor funcione adecuadamente, la concentración de hidrógeno disuelto debe ser muy baja (Solera, *et al.* 2014, pág. 65).

### **Ácidos volátiles**

Son los intermediarios más importantes en el proceso anaerobio, ya que son los precursores de la formación de metano. No obstante, la acumulación de AGVs (Ácidos Grasos Volátiles) en él, causadas por temperatura, sobrecarga orgánica, compuestos tóxicos, etc., puede resultar en concentraciones inhibitorias para los microorganismos, sobre todo los metanogénicos (Solera, *et al.* 2014, pág. 66).

### **Ácidos grasos de cadena larga**

Formados durante la degradación anaerobia de lípidos degradados posteriormente a acetato e hidrógeno por los microorganismos acetogénicos a través de la  $\beta$ -oxidación, su toxicidad depende del tipo de microorganismo (metanogénicos acetoclásticos son más sensibles que los metanogénicos hidrogenotróficos), de la temperatura (microorganismos termófilos son más sensibles que los mesófilos) y de la morfología de la biomasa (biomasa en suspensión más sensible que la biomasa granular) (Solera, *et al.* 2014, pág. 66, 67).

### **Presencia suficiente de nutrientes**

Una relación de Carbono/Nitrógeno baja produce un digerido fácil, siendo el Nitrógeno (N) el principal nutriente para el crecimiento y la actividad de las bacterias en el biodigestor (Marichal, 2010, pág. 27).

## Subproductos de la digestión anaerobia

### Digerido

Es un residuo orgánico que está fuertemente degradado que puede utilizarse como fertilizante en la agricultura, ya sea directamente o tras ser sometido a un proceso de separación sólido-líquido y posterior estabilización de la fracción sólida mediante compostaje (Solera, *et al.* 2014).

### Biogás

Es un combustible formado por metano y dióxido de carbono y las proporciones relativas de estos componentes dependen del tipo de residuo a tratar (Solera, *et al.* 2014, pág. 17).

Su densidad relativa respecto al aire es de 0.86. Por otro lado, es importante mantener una presión positiva para evitar mezclarlo con el aire ya que esto puede provocar una explosión (Ferrer & Seco, 2017, pág. 136-137).

Gas	Porcentaje
Metano	50-70
Anhidrido carbónico	30-50
Nitrógeno	0.5-3
Sulfuro de hidrogeno	0.1-2
Vapor de agua	Saturado

Figura 5: Composición genérica del biogás. Características generales del biogás. Se manifiesta la composición porcentual como producto generado de la biometización. (Barberá, 2011).

### Componentes del biogás

#### Metano

El metano es un gas natural, no tóxico, incoloro e inodoro su composición permite que este sea el principal componente de los hidrocarburos; CH<sub>4</sub> es una molécula que está

constituida por un átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno (Burgos & García, 2002, pág. 4). Este mismo constituye un 80-90% del *gas natural* y calor molar es de 56 kJ/g, el cual es mayor que el de otros hidrocarburos (Caballero & Pérez, 2014, pág. 131-139).

## **Dióxido de Carbono**

El metano que se obtiene del proceso anaerobio es el mismo gas que forma parte en un 97% del gas que se extrae de los yacimientos petroleros que utilizamos en nuestros domicilios por medio de los gasoductos (Barberá, 2011, pág. 85).

## **Usos del biogás**

El biogás generado de la biometización tiene diversas utilidades parecidas a la del gas natural ya que, puede servir como combustible para cogeneración, quemadores, estufas, infrarrojos, iluminación, motores de combustión y generación de electricidad (Barberá, 2011, pág. 82).

## **Biodigestores anaerobios**

Son reactores biológicos colocados en condiciones ambientales adecuadas conjuntamente con la alimentación que contiene los sustratos necesarios con una microbiota que metabolizan los nutrientes anaeróbicamente dando como resultado el digerido y el biogás (Flotats, *et al.* 2016, pág. 41).

Es una tecnología que mediante un depósito abierto da lugar a la fermentación anaeróbica de la materia orgánica. Para construirlo es esencial definir el tamaño, forma, material y aislamiento, para garantizar la estanqueidad tanto de gases como de líquidos, si en caso requiera un mantenimiento para su funcionamiento (Fernández, *et al.* 2015, pág. 349).

## **Tipo de biodigestor anaerobio utilizado**

### **Sistema discontinuo**

La tecnología sigue un mismo comportamiento de la curva de crecimiento de microorganismos, para la producción de biogás. Donde el tiempo de retención no tiene sentido, y se trabajaría con el tiempo de digestión, intercalando el tiempo y buscar una mejoría en la producción de metano. Esta tecnología resulta un poco dificultad debido a que se tienen que combinar y ponerlos marcha en un tiempo (Departamento de Energía, 2007, pág. 29).

### **Actividad metanogénica Específica**

La actividad Metanogénica Específica es una metodología que permite definir la capacidad de determinar la población de microorganismos para degradar un sustrato, además mide la concentración del sustrato a lo largo del tiempo; muchas de las metodologías anaeróbicas miden el sustrato consumido y la generación de metano, mientras que en la AME se adiciona la medida de la desaparición de sustrato (Hernández, *et al.* 2014, pág. 197).

La actividad metanogénica específica determina la producción de biogás de una biomasa anaerobia, el cual contiene metano y dióxido de carbono; además el monitoreo se realiza mediante el incremento de presión. Tener en cuenta, que la implantación de la metodología AME es sencillo, ya que se debe realizar conexiones en viables de ensayo mediante un tubo a una trampa con NaOH (25 g/L solución alcalina con un  $\text{pH} > 12$ ), el cual permite la retención del  $\text{CO}_2$ , por ende el volumen desplazado es la medida directa del metano producido además, cuando el pH está por debajo del 6.5 la actividad metanogénica desciende y sobre todo que totalmente inhibida con un pH 5.5 (Díaz, 2019, pág. 166).

## **Producción de metano y cálculo de la AME**

Para calcular la producción de metano mediante la metodología AME, es necesario saber la pendiente del volumen acumulado de cada reactor, para poder reemplazar en las *Ecuaciones 8 y 9*.

### **Curva de Gompertz**

Es un modelo que permite estudiar las curvas de producción acumulada de Biogás en función del tiempo se utiliza el modelo de modelización paramétrico. Este es un caso particular de curva logística que se rige entre el parámetro de Tiempo, cuando este se aproxima a cero o infinito expresándose en la *Ecuación 11* (Usó & Mateu, 2002, pág. 288).

### **Recursos orgánicos**

#### **Estiércol de ganado vacuno**

La producción de estiércol animal es el residuo orgánico más importante que se genera en grandes cantidades puesto que, una estimación mostro que en Alemania y otros países industrializados el 80 % del total de residuos orgánicos y entre el 45 y 55% de residuos orgánicos como materia seca, son de origen ganadero. En el caso del ganado vacuno la cantidad diaria excretada es de 8-9% (Sánchez, *et al.* 2016, pág. 26).

Es necesario mencionar, que las deyecciones más importantes son los estiércoles y purines de vacuno, porcino y también de gallinaza y el purín de avícola, el aprovechamiento de estos es importante ya que, disminuye la acumulación de desechos y, por lo tanto, ayuda a controlar la contaminación y a proteger el ambiente (Sánchez, *et al.* 2016, pág. 19).

### **Alimento de ganado vacuno**

#### **Composición del ORDEÑO EXTRA**

Este concentrado tiene siguiente composición: proteína min 14%, Equivalente proteico del nitrógeno no proteico máximo min 4%, Grasa min 2.5%, Fibra máx. 25%, Cenizas min 10% y Humedad min 13% (Solla Nutrición Animal, s/f).

### **Composición de la alfalfa**

La alfalfa como suplemento a la alimentación del animal vacuno; este tiene una alta concentración de proteína y fibra; siendo estas propiedades favorables para la producción de leche como también contribuye a la digestión en el rumen, la composición nutritiva del cultivo en flor completa es la siguiente: Materia Seca%: 33.81, Cenizas Totales%: 8.02, Proteína Cruda%: 17.67, Fibra Cruda%: 23.65, Fibra detergente acida%: 28.13, Fibra detergente neutro %: 35.97, Energía Metabolizable Mcal/kg: 2.31, Energía Metabolizable fermentable Mcal/kg: 2.14, Ca%: 1.60, P%: 0.30 y Mg%: 0.27 (Anrique, 2014, pág. 30).

El tipo de alimento que consume el rumiante dependerá la concentración de calidad tanto en el estiércol como en la orina del vacuno, ya que actúa con uniformidad en un mayor periodo de tiempo (Moreno, 2015, pág. 108). Cabe resaltar, que la estructura física del alimento ingerido es de suma importancia en el rumen del animal, siendo la fibra una de los principales compuestos de ingesta. Como también, el pH en el rumen depende del tipo de alimento que ingiera el vacuno, con la finalidad de que los microorganismos hidrolicen la ingesta (Ramírez, 2017).

### **Aguas residuales**

#### **Origen de las aguas residuales**

Son generadas por las diferentes actividades del hombre, siendo estas de origen domestico urbano provenientes de lavandería, cocina, baño, sistema de drenaje de calles y avenidas, aguas de lluvia y lixiviados (Carhuancho, Salazar, 2015, pág. 1 & Espejo & León, 2017, pág. 27).

Constituyente	Concentración mg/L		
	Alto	Medio	Bajo
Sólidos totales	1200	700	350
• Disueltos totales	850	500	250
• Fijos	525	300	145
• Volátiles	350	200	105
DBO (5 días, 20 °C)	300	200	100
DQO	570	380	190
Nitrogeno total (como N)	85	40	20
Fosfor total (como P)	20	10	6
Cloruros (Cl)	100	50	30
Alcalinidad (como Ca CO <sub>3</sub> )	200	100	50
Grasas	150	100	10
Calcio (como Ca)	110	50	10
Magnesio (como Mg)	10	9	8
Sodio (como Na)	100	50	23

Figura 6: Composición típica de aguas residuales domésticas de la PTAR-COVICORTI (Ballarte & Coronado, 2006).

### Lodos del tratamiento de aguas residuales

Los lodos conocidos también como biosólidos, son productos resultados del tratamiento de las aguas residuales, su producción resulta de procesos acumulativos de microorganismos, materiales en suspensión, materia orgánica no biodegradable. Sus principales características son 20-30% de sequedad; 60-80% de materia orgánica; 40-20% de materia inerte y 3-5% de nitrógeno. Por otro lado, se presencia un escaso contenido de P y K; metales pesados y microorganismos patógenos como: bacterias, parásitos intestinales y virus (Wiki, 2007, pág. 8-9).

Para tener mejor soporte en el trabajo de investigación se consideró la caracterización química de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Covicorti de trabajos realizados por otros autores.

Código de Laboratorio				G-2
Parámetros		Simbolo	Unidad	LODO
Contenido de agua			%	41.42
Ph				6
Nutrimientos	Nitrógeno asimilable	NO <sub>3</sub> -N	% MS	0.0002
	Fosforo	P	mg/Kg.MS	137
	Potasio	K	mg/Kg.MS	265
Cationes Cambiables	Nitrógeno	N	%MS	0.022
	Calcio	Ca	ppm.MS	5484
	Magnesio	Mg	ppm.MS	687
Metales pesados	Sodio	Na	ppm.MS	676
	Cromo Total	Cr	ppm.MS	1,43
	Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	ppm.MS	1,02
	Mercurio	Hg	ppm.MS	0,11
	Cadmio	Cd	ppm.MS	<0,01
	Plomo	Pb	ppm.MS	<0,01

Figura 7: Composición del lodo fresco de las lagunas facultativas de Covicorti-Trujillo (Ballarte & Coronado, 2006).

Condiciones de Operaciones de la PTAR Covicorti		
Días de acumulación del lodo flotante		25 días
Parámetro	Unidad	Cantidad
Solidos Totales	mg/L	532,000
Solidos Totales Volátiles	mg/L	306,890
Solidos Totales Fijos	mg/L	225,110
Temperatura	°C	23.5
pH		7.4
Conductividad	mS/cm <sup>2</sup>	1508,00
Humedad	%	90.83
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	10,560.25
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	75,490.18
Aceites y grasas	mg/Kg	1,780.00
Fosforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	% sms	2.8
Nitrógeno	mg/L	5.7
Fierro	mg/L	0.45
Sulfatos	mg/L	125.26
Calcio	mg/L	5.02
Magnesio	mg/L	14.22
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	5.0*10 <sup>7</sup>
Coliformes Totales	NMP/100 ml	9.0*10 <sup>8</sup>

Figura 8: Caracterización de los lodos flotantes de las lagunas facultativas de la PTAR de Covicorti (Ballarte & Coronado, 2006).

PROPIEDADES QUÍMICAS	VALOR/ BASE SECA
pH (25°C)	6.94
Materia Orgánica %	50.20
Nitrógeno %	2.30
Fósforo mg/kg	2400.00
Potasio mg/kg	3500.00
Calcio %	5.17
Magnesio %	0.31
Sodio %	0.24
Zinc mg/kg	580.30
Hierro mg/kg	7318.00
Cobre mg/kg	65.50
Cromo mg/kg	2452.00
Plomo mg/kg	85.20
Cadmio mg/kg	1.72
Magnesio mg/kg	174.60

Figura 9: Propiedades químicas de lodos residuales del PTAR COVICORTI (López & Mendoza, 2018).

Ítems	Masas	Carbono Orgánico Total %	Nitrógeno orgánico Total %	Relación: C/N
1	0.259	2.35	3.38	69.53
2	0.227	2.67	3.33	80.18
3	0.270	2.71	3.20	75.31
x	0.252	2.58	3.30	7001

Figura 10: Caracterización de la PTAR – COVICORTI (López & Mendoza, 2018).

Asimismo, Bacilio (2016, pág. 35) determinó el pH de una mezcla de 1400 g estiércol de bovino con 600 g lodo seco, dando como resultado de pH 8.74; por otro lado, Ballarte & Coronado (2006) manifiesta que los lodos de Covicorti tienen un promedio de 26.6% ST.

## 1.2. Marco Normativo

### Resolución Ministerial N° 093-2018 VIVIENDA

Esta resolución aprueba el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos, como una herramienta que permite establecer los procedimientos y metodologías que deben cumplirse para la determinación de la calidad de Lodos provenientes de las PTAR para

la disposición final o reaprovechamiento; además es indispensable para las acciones de supervisión y fiscalización ambiental.

### **Decreto supremo N° 015-2017- VIVIENDA**

Este decreto mediante el Artículo 1, tiene como finalidad establecer las disposiciones de lodos, producto final de las PTAR para determinar sus características, clasificación, parámetros de producción y su control, por medio del Artículo 2, el Reglamento es aprobado el cual, promueve el reaprovechamiento de los biosólidos mediante la su transformación para ser utilizado por la actividad agrícola, forestal e industrias teniendo en cuenta los riesgos hacia la salud y el ambiente.

### **Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM**

El presente Decreto Legislativo aprueba, Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos N° 1278, con la finalidad de establecer las obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad para asegurar, la gestión y manejo de residuos agropecuarios que pertenecen a la categorización de residuos no municipales, para el manejo de estos residuos el dueño o generador es responsable de contratar a una Empresa Operadora de Residuos Sólidos (EORS).

### **Decreto Supremo N° 064-2010-EM-Política Energética Nacional del Perú**

El presente decreto de Energía y Minas, establece mediante el objetivo 6, el desarrollo de un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible, con la finalidad de impulsar el desarrollo y uso de energías limpias con tecnologías en bajas emisiones contaminantes evitando la biodegradación de los recursos, establecer medidas para la mitigación de emisiones provenientes de las actividades energéticas, alcanzar una normativa ambiental con requerimientos compatibles con la política nacional del ambiente y los estándares internacionales, promover e incentivar el uso de residuos sólidos y líquidos

para la producción de energía como también, promover prácticas de responsabilidad social en las actividades energéticas y relaciones armoniosas entre el estado, las comunidades y empresas del sector energía.

### **Decreto Supremo N° 044 2006-AG**

Este presente Decreto se aprueba el Reglamento Técnico para los Productos Orgánicos, donde el Artículo 23, manifiesta que el manejo de las excretas de los animales debe complementar un proceso de fermentación para prevenir focos infecciosos, además el Artículo 11, menciona que, para el uso de abonamiento orgánico, con estiércol animal preferentemente debe ser compostado.

### **1.3. Formulación del Problema**

¿Se producirá biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020?

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar la producción de biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

**OE1:** Determinar los parámetros fisicoquímicos de los lodos del tratamiento de aguas residuales y del estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.

**OE2:** Determinar la cinética de producción volumétrica de biogás de la ciudad de Trujillo, 2020.

**OE3:** Calcular la Actividad Metanogénica Específica de cada tratamiento de la ciudad de Trujillo, 2020.

## 1.5. Hipótesis

**H:** Si se produce biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de investigación

Es descriptiva simple, ya que trabaja con una sola variable y tiene por objetivo describir la realidad de los hechos y su correcta interpretación mediante un análisis (Sanca, 2011 y Ñaupas, Palacios, Valdivia & Romero, 2019); en esta investigación es clave la profundidad teórica en base al planteamiento de investigación para comprender el valor de los resultados obtenidos (Hernández & Coello, 2012).

### 2.2. Población y muestra

#### 2.2.1. Población

Los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales y estiércol de ganado vacuno de un establo.

#### 2.2.2. Muestra

2400 ml de mezcla de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno.

### 2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

#### 2.3.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

##### A. Técnicas de recolección de datos

La técnica que se empleara es de la observación de tipo directo, ya que permite ver, registrar y analizar; el comportamiento y la diferencia de cada uno de los tratamientos; T1(Estiércol de ganado vacuno), T2 (Lodos de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales) y T3(Estiércol de ganado vacuno con Lodos de Planta de

Tratamiento de Aguas Residuales). Por ello, se tuvo en cuenta realizar los siguientes análisis a cada sustrato:

- Análisis potenciométrico
- Análisis de gravimetría
- Análisis de gravimetría - Método por volatilización

#### **A. Instrumentos de recolección de datos**

El instrumento de recolección de datos a utilizar es una guía de observación, el cual nos permite, registrar datos que se analizarán a cada uno de los sustratos empleados.

##### **a. Protocolo de Monitoreo de Biosólidos**

Es una herramienta que sirve para tener una orientación técnica en la toma y manejo de muestras de lodos, permitiéndonos hacer uso de implementos de seguridad así como, etiquetas para las muestras es decir, los frascos deben ser etiquetados con letra clara y legible de preferencia debe utilizarse plumón indeleble y debe cubrirse la etiqueta con cinta transparente y la cadena de custodia que es el procedimiento documentado de la toma de muestra, transporte y entrega al laboratorio con datos pertinentes (Resolución Ministerial N° 093-2018, pág. 19-20). (Ver Anexo n° 13, 14 y 15)

##### **b. Formato para registrar datos del análisis físico químico de cada sustrato**

Este formato es una herramienta que nos permitirá registrar datos de los sustratos analizados, con la finalidad de determinar las concentraciones de cada biodigestor. El formato es brindado por los laboratorios de análisis instrumental y análisis agroindustrial de la Universidad Privada del Norte. (Ver Anexo n° 16, 17,18 y 19).

**c. Formato para el registro de los volúmenes de biogás producidos en cada tratamiento**

Este formato servirá para registrar los datos de la producción de biogás en un sistema AME, cuantificado en un determinado tiempo para su respectiva evaluación.  
(Ver Tabla 3)

**2.3.2. Métodos e instrumentos de análisis de datos**

**A. Métodos de análisis de datos**

En el proyecto de investigación se realizará los métodos de potenciometría y gravimetría para determinar las concentraciones de sustratos en cada uno de los reactores, y por consiguiente los datos obtenidos serán analizados estadísticamente.

**a. Análisis potenciométrico**

En los métodos potenciométricos hay una relación logarítmica entre el potencial y la concentración del analito. El instrumento mayormente utilizado para realizar la medición es pH-Star es decir, un electrodo de vidrio (pH) sigue las reacciones que consuman y produzcan protones. Cabe resaltar, que el pH altera la actividad enzimática (Mikkelsen & Cortón, 2009).

**b. Análisis de gravimetría**

El análisis gravimétrico consiste en la medida del peso de una sustancia estable poco soluble químicamente relacionada con la especie de análisis que por medio de un cálculo estequiométrico se determina de manera fácil la cantidad del compuesto que interviene en la reacción de estudio (López, 2010).

**c. Análisis de gravimetría - Método por volatilización**

Método por el cual las sustancias se someten a un calentamiento para que un compuesto de la muestra se separe en forma gaseosa, es decir, el análisis se

fundamenta en el peso de la sustancia volatilizada o en el peso del residuo no volátil

(López, 2010).

Tabla 1:

*VARIABLES, UNIDADES, TÉCNICAS DE MEDICIÓN E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS EMPLEADOS.*

VARIABLE	UNIDADES	TÉCNICA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
pH		Potenciometría	Multiparámetro (Hach, COHHQ40D5300000)
T°	°C	Potenciometría	Multiparámetro (Hach, COHHQ40D5300000)
Humedad	%	Gravimetría	Balanza determinadora de humedad (OHAUS)
Sólidos Totales	%	Gravimetría	Balanza eléctrica analítica (OHAUS, Metrotec) y Cocina eléctrica (FINEZZA)
Sólidos Volátiles	%	Gravimetría: Método por volatilización	Mufla (YAMATO)
Cenizas	%	Gravimetría: Método por volatilización	Mufla (YAMATO)

Nota: Elaboración propia

## B. Instrumentos de análisis de datos

Para procesar los datos registrados de cada tratamiento realizado, se emplearán programas como son: Microsoft Word y Microsoft Excel, mediante estos programas se emplearon los siguientes instrumentos como es el ANOVA y el Modelo Gompertz.

### a. Análisis de varianza

Conjunto de técnicas estadísticamente útil que sirve para comparar cuando hay más de dos grupos y se han hecho mediciones repetitivas en más de dos ocasiones que pueden afectar el resultado ya que los sujetos pueden variar en una o más características, por ello es necesario evaluar la normalidad de las varianzas mediante dos pruebas: la de Shapiro Wilk la cual, mide el grado de ajuste de datos determinados en un gráfico normalizado además sus resultados pueden ajustarse mediante un ANOVA para definir grupos (Dagnino, 2014), este contraste es el más adecuado para una muestra no superior a 50 además tampoco se requiere que los

parámetros de distribución estén especificados (Lévy & Varela, 2006); y la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis que es método más adecuado para comparar estadísticamente poblaciones cuyas distribuciones no son normales, incluso cuando las poblaciones son normales, este contraste funciona muy bien; además, esta prueba compara una estimación basada en rangos y es adecuado cuando las desviaciones típicas de los diferentes grupos no son iguales entre sí (Gabriel & Rodrigo, 2014).

### b. Ajuste del modelo de Gompertz

La bondad del ajuste del modelo fue evaluada por el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del valor de regresión, el valor de la raíz de la desviación cuadrada (RMSD, *Ecuación 12*), la normalizada RMSD (NRMSD, *Ecuación 13*) y trazando los valores obtenidos de la producción de volumen de biogás por el modelo ( $M_{\text{modelo}}$ ) en función de los valores experimentales ( $M_{\text{experimental}}$ ). La adaptación de esos datos a una la función lineal *Ecuación 14*, da como resultado tres parámetros que pueden ser utilizado para evaluar la descripción de los valores experimentales por el modelo, es decir, la pendiente lineal (a; que debe estar lo más cerca posible a uno), la intersección (b; que debe estar lo más cerca posible de cero) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ; que debe ser tan cercano como posible a uno). Es un enfoque simple y eficiente para evaluar si el modelo se ajusta (Miano, García & Duarte, 2015).

El modelo de Gompertz permite estudiar las curvas de producción acumulada de Biogás en función del tiempo se utiliza el modelo de modelización paramétrico.

- **Ecuaciones empleadas durante el análisis de datos**

Tabla 2:

*Ecuaciones empleadas para el cálculo de diferentes parámetros*

Determinaciones	Ecuaciones
-----------------	------------

**Porcentaje (%) de humedad**

W<sub>1</sub>: Masa de la muestra antes del secado (g).

W<sub>2</sub>: Masa de la muestra desecada en gramos (g).

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

**Porcentaje (%) de sólidos totales**

**Porcentaje (%) de sólidos volátiles**

W<sub>1</sub>= peso de la cápsula de porcelana o crisol (g).

W<sub>2</sub>= peso de al crisol con la muestra fresca (g).

W<sub>3</sub>= peso del crisol más la muestra (g) después de haberlas sometido a 105 °C x 1 hr.

W<sub>4</sub>= peso del crisol más la muestra (g) después de haberlas sometido a 550 °C x 1 hr.

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \left( \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \right) * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \left( \frac{W_3 - W_4}{W_2 - W_1} \right) * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

**Porcentaje (%) de cenizas**

W<sub>1</sub>= peso de la cápsula de porcelana o crisol (g).

W<sub>2</sub>= peso de al crisol con la muestra fresca (g).

Masa de las cenizas = (W<sub>0</sub>-W<sub>1</sub>) (g).

W<sub>0</sub>= peso del crisol más la muestra (g) después de haberlas sometido a 700 °C – 750 °C x 2 hr

$$\% \text{ Cenizas} = \left( \frac{\text{Masa de las cenizas}}{W_2 - W_1} \right) * 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$

**Masa de sustrato empleado en el biodigestor**

ST: materia seca (g) (dato obtenido de la Ecuación 7)

% Materia Seca: dato calculado en la Ecuación 6.

$$\text{Kg Sustrato} = \frac{\text{ST} * 100}{\% \text{ Materia Seca}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

**Porcentaje (%) de materia seca**

% Humedad: porcentaje de humedad, dato calculado en la Ecuación 1.

$$\% \text{ Materia seca} = 100\% - \% \text{ Humedad} \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

**Masa de la materia seca**

Gramos de materia: son los sólidos totales del biodigestor.

Volumen útil: volumen que se empleara para el proceso.

5%: sólidos totales del biodigestor.

$$\text{Gramos de materia seca} = \text{Volumen útil} * 5\% \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

**Producción de DQO en metano.**

K(t) = Factor de corrección (g DQO/día)

m= pendiente (L/día)

P= presión atmosférica (atm)

R= constante de los gases (62.36 mmHg\*L/mol°K)

K= carga orgánica digerida correspondiente a un mol de CH<sub>4</sub> (64 gDQO/mol)

t= temperatura operacional del montaje (°C)

$$K(t) = \frac{m * P * K}{R * (273 + t)} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

**Masa de la Actividad Metanogénica Específica producido por día**

m = pendiente máxima en la curva producción de metano (Vol. Acumulado CH<sub>4</sub> Vs tiempo)

M= masa de lodo (g).

$$\text{AME (g DQO/g STV*d)} = \frac{m * 24}{V_{CH_4} * M} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

**Masa de la Demanda Química de Oxígeno del metano producido por día**

$\frac{dDQO}{dt}$  = velocidad de producción de Metano en peso (gCH<sub>4</sub>/día)

$\frac{dCH_4}{dt}$  = Velocidad máxima de generación del metano (pendiente=l/día)

P = Presión de la zona (760 mm Hg)

M = Peso molecular del metano (16 g CH<sub>4</sub>/mol)

R = constante de la Ley de gases ( $62.36 \frac{mmHg * L}{mol * K}$ )

T = Temperatura de cada reactor (T= 273+°C)

$$\frac{dDQO}{dt} = \frac{dCH_4}{dt} * P * M \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

**Producción acumulada de Biogás: curva de Gompertz**

Y:  $\log(M_t/M_{\infty})$

t: tiempo (días)

$M_{\infty}$ : Volumen de biogás iniciales (t=0) en el biorreactor (ml)

$M_t$ : recuentos del volumen de biogás (ml) al tiempo t (día)

$\mu_{max} = a * c (h^{-1})$ : velocidad específica de producción acumulada de biogás.

$\lambda = \frac{b-1}{c}$  (h): duración de la fase de latencia

$G = \frac{\ln(2)}{\mu_{max}}$  (h): tiempo de generación

a: Volumen de biogás acumulado máxima (ml)

c:  $\left(\frac{\mu_{max}e}{a}\right) + 1$

b:  $\left(\frac{\mu_{max}e\lambda}{a}\right) + 1$

e: exponente (1)

$$\log\left(\frac{M_t}{M_{\infty}}\right) = a * e^{-e^{-(b-c*t)}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 11}$$

**Raíz valores de desviación cuadrada**

$M_{exp}$ : Datos experimentales

$M_{mol}$ : Datos ideales del modelo

n: número de experimentos

$$RMDS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - M_{model})^2}{n}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 12}$$

**Normalizada RMSD (Error normalizado)**

$M_{exp}$ : Datos experimentales

RMSD: Raíz valores de desviación cuadrada

$$NRMSD = 100 \frac{RMSD}{(M_{exp})_{\text{máximo}} - (M_{exp})_{\text{mínimo}}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 13}$$

**Modelo (Mmodel) en función de los valores experimentales (Mexperimental)**

A: pendiente (valor = 1)

B: intercepto Y (valor = 0)

$M_{exp}$ : Datos experimentales

$M_{mol}$ : Datos ideales del modelo

$$M_{model} = a * M_{experimental} + b \dots\dots\dots \text{Ecuación 14}$$

Elaboración propia

**2.4.Procedimiento**

**2.4.1. Procedimiento para realizar la caracterización de los sustratos**

Para la obtención de las muestras se tomó en cuenta el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos, siendo necesario registrar el muestreo de manera estandarizada y la implementación del protocolo para el control de las muestras, de modo que sea representativa y tenga validez.

El trabajo de campo consistió en ir a conseguir los insumos requeridos para la producción de biogás, en este caso fue el estiércol de ganado vacuno que fue muestreado del establo San José ubicado en el sector el Trópico del distrito de Huanchaco y lodo del tratamiento de aguas residuales que fue extraído de la planta de tratamiento de aguas residuales de Covicorti de la provincia de Trujillo.

#### 2.4.2. **Muestreo del estiércol de ganado vacuno y lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales**

Para realizar el muestreo del estiércol de vacuno y selección de la muestra se realizó el método de cuarteo basado en el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos en el que explica que se debe tomar una muestra representativa de acuerdo al volumen necesario para el análisis, basados en el protocolo la muestra tomada fue homogenizada representado por una torta regular encima de una superficie lisa y limpia, se partió en cuatro (4) pedazos uniformes; dos (2) partes diametralmente opuestas se homogenizan nuevamente y se cuartea de la manera descrita, hasta que el volumen de la muestra se haya reducido al volumen necesario, esta debe de realizarse rápidamente para evitar que se descomponga la mezcla. Se tomó 1 kg de muestra de estiércol fresco (3 días), previamente para esta etapa se utilizó mandil dril, guantes y mascarilla para mayor seguridad. Finalmente, la muestra fue almacenada en bolsas de plástico y rotuladas con todos los datos pertinentes, se hizo el llenado de la cadenada de custodia conjuntamente con la firma del dueño del establo y finalmente se preservó la muestra en una caja aislada con hielo y se trasladó para hacer los análisis correspondientes en los laboratorios de Análisis Instrumental y Análisis Agroindustrial de la Universidad Privada del Norte. Se tuvo en cuenta que el ganado vacuno del establo San José es alimentado con Concentrado Ordeño Extra y alfalfa.

Con respecto, al muestreo del lodo de PTAR de Covicorti se realizó en la laguna de lodos resultado del tratamiento, basado en el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos, para realizar este muestreo se utilizó mandil dril, guantes y mascarilla para mayor seguridad y se realizó con la ayuda de una herramienta que nos permitió extraer el lodo de la profundidad de la laguna, se tomó una muestra de 2 Litros de

biosólidos en botellas de plástico esterilizadas de 1 Litro de capacidad, las botellas de muestreo fueron enjuagadas con el agua de la superficie de la laguna para luego almacenar en estas el lodo. Luego, se procedió a etiquetar las muestras, se preservó en una caja aislada con hielo y se trasladó a los Laboratorios de Análisis Instrumental y Análisis Agroindustrial de la Universidad Privada del Norte para hacer sus análisis correspondientes. El tipo de muestra que se empleó en ambos muestreos fue simple o puntual, ya que se tomaron en un punto y momento determinado.

#### 2.4.3. Armado del Montaje experimental escala de laboratorio.

##### A. Materiales

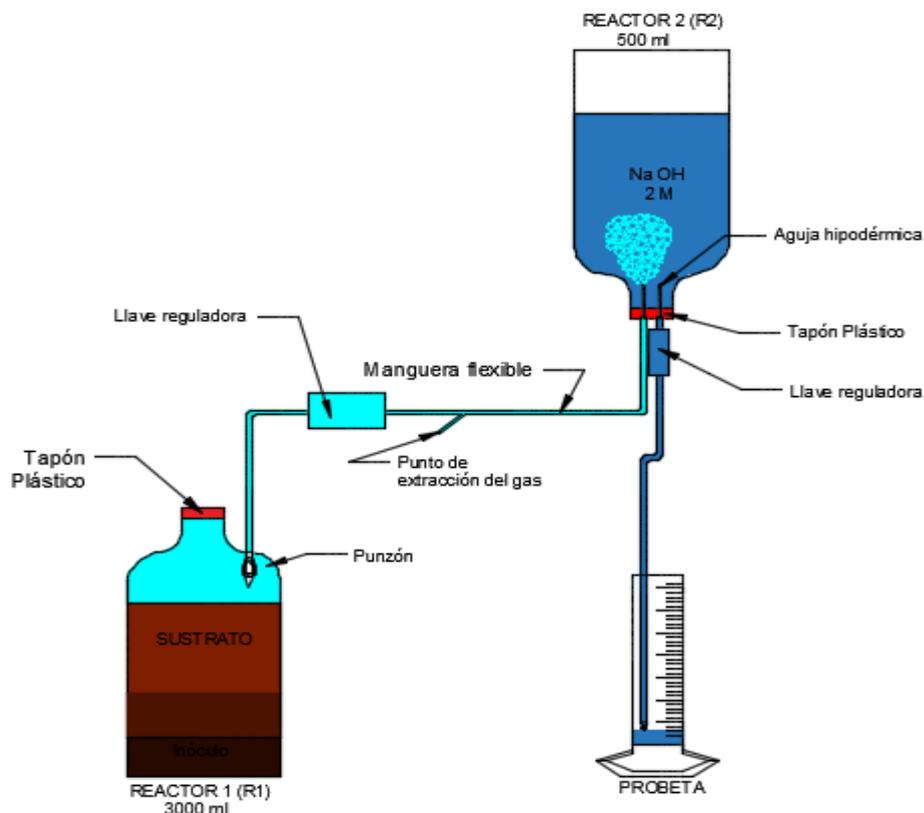
- Botellas de vidrio de 500 ml (cantidad 3 unidades)
- Botellas de plástico de 2500 ml (cantidad 3 unidades)
- Tubos de plástico transparente (cantidad 1.5 metros: diámetro externo 4.1 mm y diámetro interior 3 mm)
- Llaves reguladoras de precisión Adelberg para la conexión entre los tubos de plástico transparente (cantidad 3 unidades)
- Vasos de vidrio de 500 ml (cantidad 3 unidades)
- Probetas graduadas de 50 ml (cantidad 3 unidades)
- Tapas de plástico (cantidad 6 unidades)
- Adhesivo de contacto multiuso (cantidad 3 unidades)
- Catéteres intravasculares (Cantidad 6 unidades, diámetro 3 mm)

##### B. Procedimiento

Para construir el sistema experimental a escala de laboratorio para la producción de biogás se siguió los siguientes pasos:

- ✓ Se seleccionó 3 botellas plásticas de 3 L de material resistente, 3 botellas de vidrio de 500 ml, 6 tubos de plástico transparente y 6 catéteres intravasculares.

- ✓ Se procedió hacerles huecos a las 3 botellas de plástico para insertar los tubos de plástico transparente en cada una y se aseguró herméticamente con adhesivo de contacto multiuso.
- ✓ Luego, se conectó con las 3 botellas de vidrio, previamente se había hecho 2 orificios en las tapas de cada una, en los que se conectaron del mismo modo, 2 tubos de plástico transparente a cada botella de vidrio, un equipo que permitirá evacuar el gas directamente a la botella de vidrio y el otro equipo que permitirá desplazar el agua resultado de la presión del gas producido.
- ✓ Una vez armado el sistema experimental, se puso a prueba para descartar fugas de aire.
- ✓ Finalmente, se determinó las cantidades de muestra para cada tratamiento del sistema y se puso en funcionamiento.



*Figura 11:* Montaje experimental de la Actividad metanogénica específica (AME) y el recorrido del metano. El montaje consta de tres series con 3 recipientes de plásticos, 3 de vidrio y 3 de probetas.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
BIODIGESTOR 1	Botella de plástico (3L), mezcla del sustrato con agua.
BIODIGESTOR 2	Botella de vidrio de NaOH 2M (500ml), absorción del CO <sub>2</sub>
PROBETA	Almacenamiento (500ml) del volumen desplazado por el gas producido en el reactor 1.
Manguera flexible	Transporte del gas del reactor 1 al reactor 2, por la presión.
Punzón	Punzón que permite el transporte de gas del reactor 1 al reactor 2.
Tapón plástico	Tapón que es asegurado herméticamente a su respectivo reactor.
Llave reguladora	Llave de plástico para controlar el volumen de gas producido como también del líquido.
Punto de extracción del gas	Punto donde se obtiene el gas para comprobar la producción de biogás.
Aguja hipertérmica	La aguja permite el pase del gas o del líquido de un reactor al otro.

Figura 12: Materiales empleados para la elaboración del montaje experimental AME y la descripción de sus componentes. Los recipientes utilizados para los Reactores deben ser resistentes, permitiendo el correcto almacenamiento de metano, además en montaje debe ser herméticamente sellado para evitar la fuga, ya sea del gas producido u del líquido (Na OH).

En la Figura 12, se detalló los materiales que se emplearon para el montaje AME, como también la descripción de sus componentes.

La evaluación de la producción de biogás en el sistema AME se cuantifico durante 21 días utilizando el formato mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 3:

Formato para el registro de los volúmenes de biogás producidos en cada tratamiento (T1, T2 y T3)

Día	T1 (Estiércol de ganado vacuno + Agua residual)		T2 (Lodos de PTAR + Agua Residual)		T3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR + Agua residual)	
	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)
0						
1						
:						
:						
20						
21						

Nota: En la tabla se muestra el formato para el registro de la producción de biogás en cada tratamiento (T1, T2 y T3) durante 21 días.

#### 2.4.4. Análisis de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de ganado vacuno y lodos de las aguas residuales al inicio de la digestión anaerobia.

##### A. Parámetros fisicoquímicos

Al llegar las muestras al laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad Privada del Norte se dio inicio al análisis, descripción e interpretación de los resultados medidos y calculados. Las muestras son adecuadas para su análisis.

### **B. Determinación de Temperatura y pH**

Las muestras fueron diluidas en un vaso de precipitación y aforadas con agua destilada hasta 50 ml y los resultados fueron tomados con el multiparámetro por tres veces cada una.

Asimismo, cabe señalar que luego de obtener los resultados por triplicado de pH y temperatura se aplicaron pruebas estadísticas para determinar las diferencias de estos valores entre los tres tratamientos, donde se emplearon dos Test diferentes tanto para el pH y la temperatura, debido a su diferencia de distribución paramétrica y no paramétrica, evaluada previamente con el test de Shapiro Wilk. En este sentido, el pH fue analizado mediante el test de Kruskal-Wallis (no paramétrico), sin embargo, para la temperatura, se aplicó ANOVA (paramétrico).

### **C. Determinación de humedad**

Para determinar el porcentaje de humedad de las muestras se hizo uso de una balanza de humedad en la que se colocó 2 g de muestra en un platillo de aluminio y se tara automáticamente, se da en un tiempo determinado a la que se programó la balanza a una temperatura de 105 °C. El porcentaje de humedad se determinó por diferencia de peso empleando la *Ecuación 1* (Díaz, 2013).

### **D. Determinación de Sólidos totales**

Para determinar los sólidos totales se hizo por diferencia de pesos.

- ✓ Se pesó cada uno de los crisoles vacíos empleados para las muestras en la balanza analítica y se anotó sus pesos. Después se pesó 5 g de muestra de forma individual para incorporar en los vasos de precipitación.

- ✓ Al terminar de pesar se colocó en los 3 vasos de precipitación de 20 ml los 5 g de las muestras (estiércol, lodo de aguas residual y la mezcla de ambos), todo ello fue aforados con agua destilada hasta un volumen de 20 ml.
- ✓ Se agito las mezclas para homogenizar completamente las muestras.
- ✓ Se transfirió el volumen medido de las muestras bien mezcladas a un crisol y se colocó en la cocina eléctrica a 105° C por una hora.
- ✓ Finalmente se pesó nuevamente los crisoles luego de enfriarse a temperatura ambiente con las muestras evaporadas y se anotaron los resultados.

Para la determinación de los sólidos totales se utilizó la *Ecuación 2*, dada por (Díaz, 2013).

#### **E. Determinación de Sólidos volátiles**

- ✓ Para la determinación de este parámetro se realizó el mismo procedimiento de los sólidos totales a diferencia que la muestra se colocó en la mufla a 550 °C por una hora.
- ✓ Finalmente, se deja enfriar los crisoles con las muestras a temperatura ambiente, se procedió a pesar cada crisol en la balanza analítica y se anotaron los resultados.

Para la determinación de los sólidos volátiles se utilizó la *Ecuación 3*, dada por (Díaz, 2013).

#### **F. Determinación de cenizas**

- ✓ Después de obtener los resultados de los sólidos volátiles de las tres muestras. Las muestras fueron llevadas a la mufla a una temperatura entre 700 °C – 750 °C por 2 horas. Teniendo en cuenta que el aumento de la temperatura debe ser progresiva para evitar que se produzcan carbonatos (carbonos inorgánicos).
- ✓ Luego, se dejó enfriar los crisoles a temperatura ambiente y se pesó en una balanza analítica y posteriormente se anotó los resultados obtenidos.

Para la determinación del % de cenizas se utilizó la *Ecuación 4* (Díaz, 2013).

### **G. Determinación de la carga para los tratamientos del sistema experimental**

Basándose en la metodología realizada por Valdez (2016) se consideró que es fundamental calcular el porcentaje de la materia seca para saber la cantidad de sustrato que tendrá nuestro biodigestor y se tuvo en cuenta, que el volumen útil del reactor será de un 5% de sólidos totales, representado en el biodigestor. Mediante la *Ecuación 7* se calculará la cantidad de sustrato para encontrar el porcentaje de sólidos deseados. Como también la *Ecuación 6* permite calcular el porcentaje de materia seca, obteniéndose de la resta entre el 100% de la humedad menos el porcentaje de humedad calculada previamente. Y para determinar la cantidad de la muestra requerida en el biodigestor, se empleará la *Ecuación 5*.

Posteriormente de haber de analizar los parámetros físico-químicos se establecieron las concentraciones de los tres tratamientos utilizando lodos de PTAR, estiércol de vacuno con lodos de PTAR, los cuales fueron calculados mediante un proceso de fórmulas que ayudaron a determinar las cantidades exactas de sustrato en cada tratamiento. Además, se tuvo en cuenta el espacio de un 20% de volumen en cada reactor para el almacenamiento del gas. A continuación, en la Tabla 4 se detallará las cantidades empleadas en cada biodigestor.

Tabla 4:

*Pruebas individuales para cada muestra, estableciendo de la mezcla óptima para cada uno de los tratamientos adicionados con estiércol de ganado vacuno y el lodo de aguas residuales respectivamente.*

MUESTRAS	CODIFICACIÓN	CANTIDADES UTILIZADAS	
<b>Tratamiento 1 0:100</b>	T1 (Estiércol de ganado vacuno + Aguas residuales)	226 g estiércol de ganado vacuno + aforo con aguas residuales a 2400 ml del depósito. (Volumen útil - 80%)	600 ml espacio para el almacenamiento de gas (20%)
<b>Tratamiento 2 100:0</b>	T2 (Lodos de PTAR + aguas residuales)	400 g lodos de PTAR + aforo con aguas residuales a 2400 ml del depósito. (Volumen útil - 80%)	600 ml espacio para el almacenamiento de gas (20%)
<b>Tratamiento 3 50:50</b>	T3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR + Agua residual)	160 g lodos de PTAR +160 g estiércol de ganado vacuno + aforo con aguas residuales a 2400 ml del depósito. (Volumen útil - 80%)	600 ml espacio para el almacenamiento de gas (20%)

## H. Tiempo de monitoreo del proceso de digestión anaerobia

Según, López, Pérez & Canet (2016) la medición de producción de biogás en 21 días es uno de los indicadores utilizados para evaluar la estabilidad de distintos residuos, siendo recomendado por diferentes legislaciones. Basándonos en lo ya mencionado, el inicio del monitoreo de la digestión anaerobia fue desde las 7:00 pm del día 14 de mayo del 2019 hasta las 7:00 pm del día 03 de junio del 2019, tras finalizar el monitoreo se analizará los datos obtenidos para determinar la alta o baja probabilidad de producción de biogás en los tres tratamientos, empleando lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno.

## I. Determinación del volumen de biogás producido

Para determinar el volumen de biogás producido se midió con una probeta. El biogás producido se conduce a través de una solución de hidróxido de sodio para

eliminar por completo el contenido de dióxido de carbono y por lo tanto detectar la cantidad de metano.

El metano formado desplaza agua de la botella (Na OH). Se recogió y se midió el volumen desplazado cada 5 días hasta finalizada el tiempo de evaluación (21 días), la información completa se extrajo (Ljarza, 2017).

#### **J. Determinación promedio de producción de biogás de cada tratamiento durante 10 días.**

De los datos obtenidos durante 21 días de evaluación de producción de biogás, teniendo en cuenta, la producción constata de cada tratamiento (Ver *figura 14 y 15*) se seleccionaron 10 días de producción, para comparar cuál de los tratamientos tuvo mayor producción volumétrica de biogás, puesto que, los datos obtenidos tuvieron una distribución normal se empleó el test de Shapiro Wilk (Ver Anexo 4) y mediante una gráfica de cajas y bigotes se pudo distinguir el mayor rendimiento de producción de biogás (Ver *Figura 14*).

#### **K. Modelación de la cinética de producción de biogás**

Los datos obtenidos permitieron evaluar la producción de biogás con respecto al tiempo mediante una función lineal teniendo en cuenta los parámetros A y B los cuales predicen el comportamiento de la tasa de producción acumulada de Biogás, para ello se utilizó la estadística descriptiva para ver el ajuste modelo que se adapta mejor al cambio de variable. En este sentido, se evaluó diversos estadísticos dando como resultado que la bondad de ajuste del modelo de Gompertz relaciona con 99% la producción de biogás y el tiempo. Para llevar a cabo este procedimiento se empleó programa Microsoft Excel.

## L. Determinación de la Actividad Específica Metanogénica de los reactores

Según Torres & Pérez (2010) dan a conocer que la siguiente expresión es necesaria para el cálculo de la actividad metanogénica específica (AME) *Ecuación 9*, por ende, para calcular la cantidad de DQO del metano producido por día se emplea la *Ecuación 10* según Manobanda & Heras (2015, pág. 103), donde se hace uso de la velocidad específica de crecimiento de metano en los reactores. En la *Figura 13* se muestra una serie de datos de volumen CH<sub>4</sub> teórico a diferentes temperaturas sometidas cada reactor.

Temperatura (°C)	ml CH <sub>4</sub> seco/g de DQO
10	363
15	369
20	376
25	382
30	388
35	395
40	401
45	408
50	414

*Figura 13:* Factor de conversión de gramos de DQO a mililitros de CH<sub>4</sub> bajo diferentes temperaturas y a una presión de 1 atmosfera (Díaz, Espital & Molina, 2002).

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

En este capítulo se presentará los resultados obtenidos, los cuales proporcionan la solución a los objetivos planteados.

### 3.1. Análisis de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de ganado vacuno, lodo de Aguas Residuales (ARS) y la mezcla de ambos.

La Tabla 4 describe las diferencias entre los distintos sustratos, al inicio de la carga de los biodigestores, las mediciones de los medios de biodigestión, permite establecer diferencias entre ellos.

Tabla 5:

*Resultado del análisis de la temperatura y pH de los residuos, durante la carga sólido de los biodigestores (T1, T2 y T3)*

TRATAMIENTOS	pH	Temp °C
T1: Estiércol de ganado vacuno+ Agua residual	7.18±0.08 <sup>c</sup>	25.90±0.50 <sup>b</sup>
T2: Lodos de PTAR+ Agua residual	10.03±0.01 <sup>d</sup>	30.00±1.00 <sup>a</sup>
T3: Mezcla (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR+ Agua residual)	8.87±0.02 <sup>cd</sup>	28.50±0.50 <sup>a</sup>

Nota: Los resultados de pH y Temperatura con letras iguales, por columna, corresponden a promedios estadísticamente iguales, promedio de 3 repeticiones de análisis.

La Tabla 5, muestra, con respecto al pH inicial, al realizar el análisis de rangos de pH, la mezcla no se diferencia, ni del estiércol, ni del lodo; sin embargo, el lodo si se diferencia del estiércol. Por otro lado, con respecto a la Temperatura inicial, al realizar el análisis de varianza de los promedios, el lodo y la mezcla son estadísticamente iguales, mientras que el estiércol es diferente a los anteriores medios.

Tabla 6:

*Resultado del análisis de los parámetros químicos de los residuos para la carga sólido de los biodigestores (T1, T2 y T3)*

TRATAMIENTOS	Humedad %	Sólidos Totales %	Sólidos Volátiles %	Cenizas %
T1: Estiércol de ganado vacuno+ Agua residual	47	44.68	32.25	24.75
T2: Lodos de PTAR+ Agua residual	70	28.75	21.6	16.00
T3: Mezcla (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR+ Agua residual)	62.5	37.72	26.8	21.45

Nota: En la tabla los resultados expresados en base húmeda.

Los análisis químicos de los sustratos, se muestran la Tabla 6: en cuanto a, la Humedad; el estiércol tiene un menor porcentaje tanto en el lodo como en la mezcla; en cuanto al porcentaje de sólidos totales, sólidos volátiles y cenizas, la mezcla tiene valores intermedios al del estiércol y al del lodo.

### 3.2. Determinación de la producción de biogás

Los resultados de los volúmenes acumulados y totales de biogás producido en los tratamientos tanto T1 (Estiércol de ganado vacuno + Aguas residuales), T2 (Lodos de PTAR + Aguas residuales) y T3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR + Aguas residuales), fueron registrados durante 21 días en un tiempo de 10 minutos, esto se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7:

*Registro de datos de la producción de biogás en cada tratamiento.*

Día	T1 (Estiércol de ganado vacuno)		T2 (Lodos de PTAR)		T3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos de PTAR + Agua residual)	
	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)	Producción diaria (ml)	Prod. Acumulado (ml)
Inicio	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	28	28
2	0	0	0	0	62	90
3	0	0	0	0	157.5	247.5
4	0	0	14	14	165	412.5
5	0	0	20	34	159	571.5
6	10	10	37	71	184	755.5
7	15	25	50	121	190	945.5
8	30	55	65	186	220	1165.5
9	66	121	68	254	215	1380.5
10	42	163	75	329	198	1578.5
11	62	225	70	399	200	1778.5
12	57	282	63	462	254	2032.5
13	60	342	72	534	239	2271.5
14	60	402	80	614	267	2538.5
15	56	458	50	664	275	2813.5
16	65	523	44	708	252	3065.5
17	81	604	68	776	230	3295.5
18	96	700	52	828	150	3445.5
19	104	804	48	876	136	3581.5
20	98	902	40	916	142	3723.5
21	89	991	40	956	114	3837.5

Nota: Registro de datos de la producción de biogás en cada tratamiento durante 21 días mediante el sistema experimental AME

En la *figura 14*; se muestran 10 días seleccionados de producción volumétrica de biogás constante.

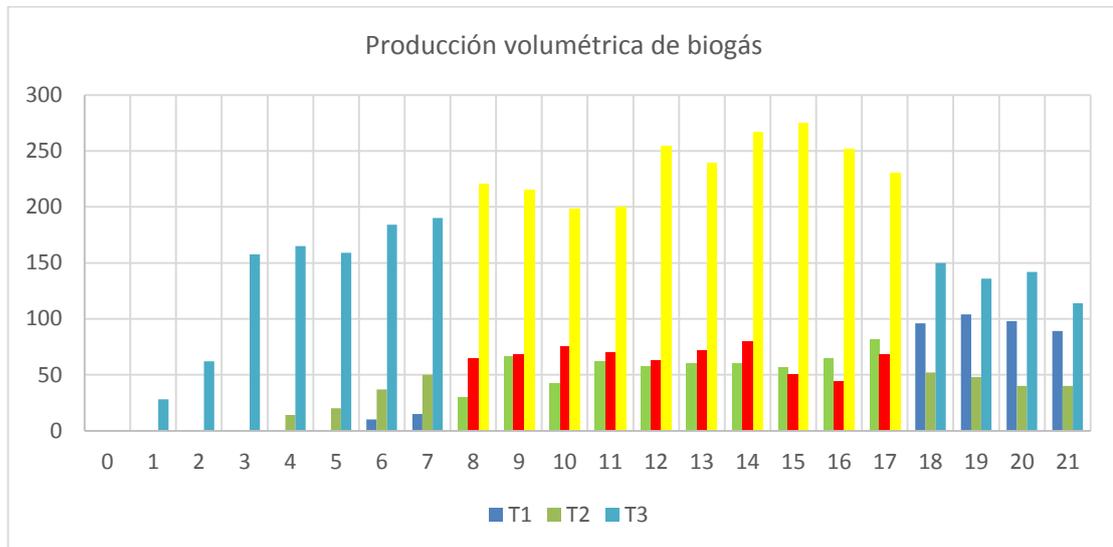


Figura 14: Producción diaria de biogás durante.

En la *Figura 15*, se evidencia que entre los días 8 y 17 de producción de biogás el tratamiento T3 (Mezcla del T1 y T2) arrojó mayor producción volumétrica de biogás en comparación a los tratamientos T1(Estiércol de ganado vacuno) y T2(Lodos de PTAR).

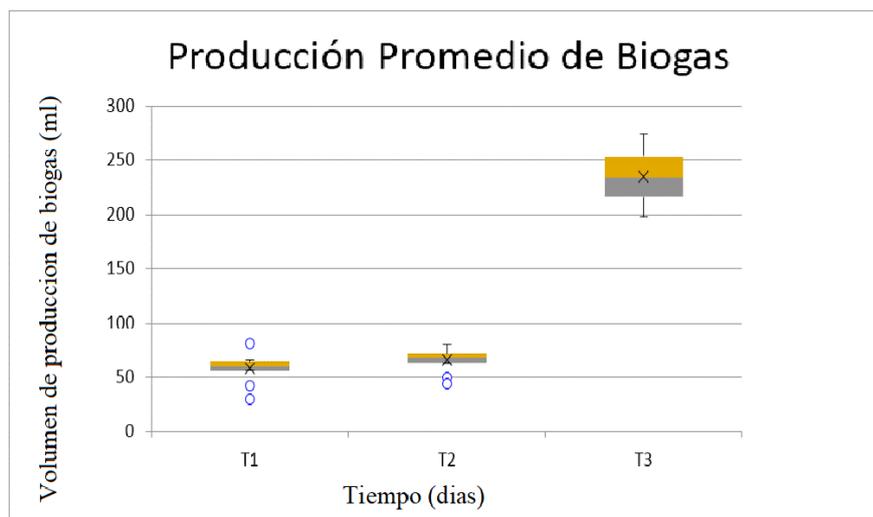


Figura 15: Diferencia del promedio de la producción diaria de biogás.

### 3.3. Determinación de la cinética de producción volumétrica de metano

El ajuste de la cinética de producción acumulada de biogás de cada tratamiento, fue descrito con el modelo matemático de Gompertz que permite estudiar las curvas de producción acumulada de Biogás. Las siguientes figuras muestran el ajuste del modelo que tuvo cada tratamiento en función de volumen y tiempo.

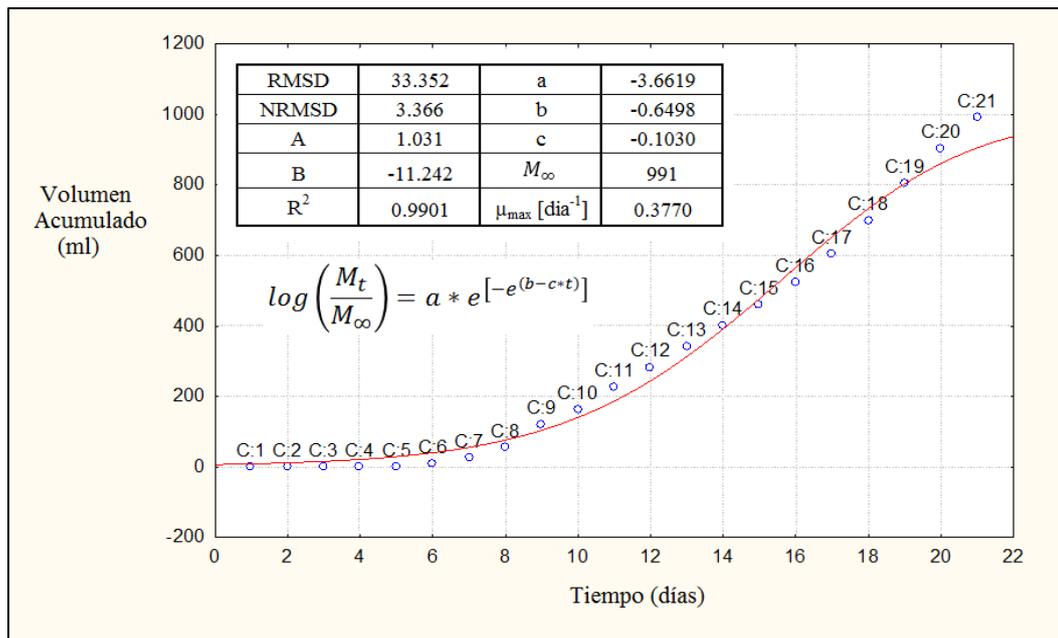


Figura 16: Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 1 (Estiércol de ganado vacuno + Agua residual).

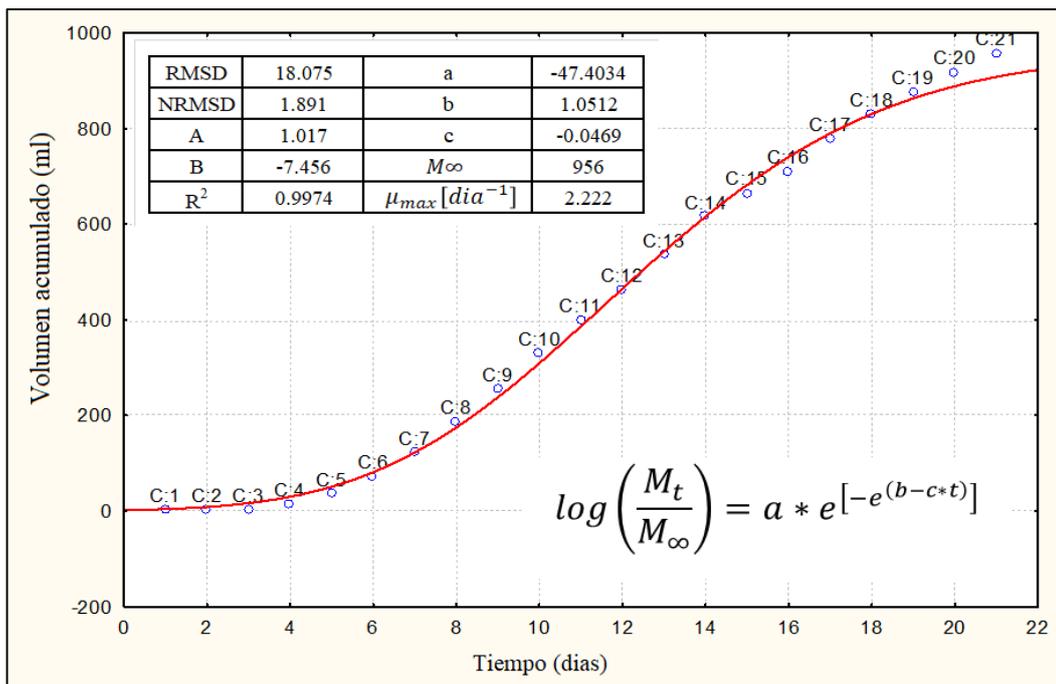


Figura 17: Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 2 (Lodos PTAR + Agua residual).

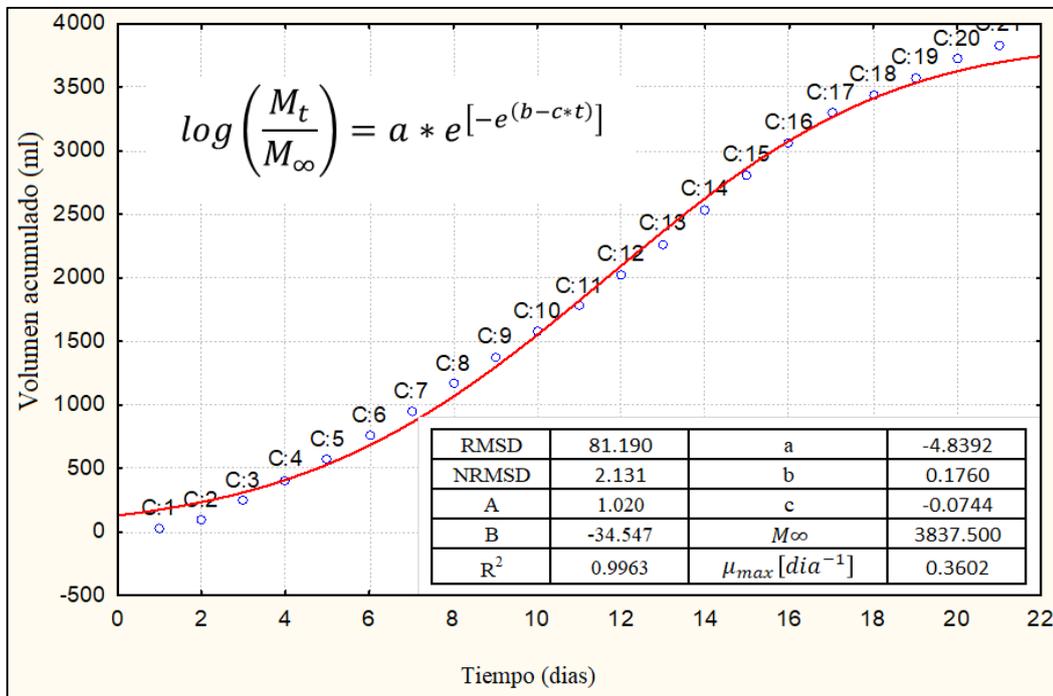


Figura 18: Ajuste del modelo de Gompertz para la producción acumulada de Biogás en el Trat. 3 (Estiércol de ganado vacuno + Lodos PTAR + Agua residual).

Según los datos estadísticos de cada tratamiento (*Figuras 16, 17 y 18*), la predicción del modelo Gompertz tiene una buena correlación entre la producción volumétrica de biogás y el tiempo; en cuanto a la precisión el Error Normalizado (NRMSD) es bajo, lo cual indicaría un buen ajuste, sin embargo, la forma sigmoïdal no es completa a lo largo de la curva lo cual, se evidencia con el valor del intercepto del eje que está alejado del valor 0 (cero) lo que indicaría una parcial predicción de los valores.

En cuanto a las velocidades específicas de los crecimientos de producción volumétrica de biogás en cada Tratamiento: el T2 tuvo  $2.222 \text{ ml/ día}^{-1}$ , siendo esta mucho más mayor tanto al T1 como T3; que tuvieron una similitud en sus valores;  $0.377 \text{ ml/ día}^{-1}$  (T1) y  $0.3602 \text{ ml/día}^{-1}$  (T3).

### **3.4.Cálculo de la Actividad Metanogénica Específica de cada tratamiento**

Para calcular la Actividad Metanogénica Específica de cada tratamiento se utilizó las *Ecuaciones 9 y 10* empleando los valores obtenidos de la velocidad de producción volumétrica (ml/día) en las *Figura 20*, como también la *Ecuación 8*, servirá para obtener datos de la producción de DQO en metano. Según Díaz, Espital & Molina (2002) se puede calcular el volumen del CH<sub>4</sub> teórico de acuerdo a las diferentes temperaturas sometidas cada reactor, como se muestra en la *Figura 13*. En la Tabla 8 se puede apreciar que el tratamiento con mayor actividad metanogénica es T3 (Mezcla de T1 y T2) valor estimado a partir de ecuaciones matemáticas.

Tabla 8:

*Resultado de la velocidad específica, producción de DQO en metano, producción de metano por día (AME) y volumen teórico de metano en los reactores (T1, T2 y T3)*

	Velocidad ml/día	$dDQO/dT$ (g O <sub>2</sub> /día)	AME por día (g DQO/gSTV * día)	V CH <sub>4</sub> (ml) teórico ** con Temperatura 21°C, 1012 hPa
T1 (Estiércol de ganado vacuno + Agua residual)	59.521	0.152	0.509	365
T2 (Lodos PTAR + Agua residual)	65.939	0.168	0.607	388
T3 (Estiércol de ganado de vacuno + Lodos PTAR + Agua residual)	240.360	0.620	1.714	379

Nota: \*\* el Volumen de CH<sub>4</sub> teórico fue calculado mediante la diferencia del factor de los gramos de DQO a mililitros de CH<sub>4</sub> bajo diferentes temperaturas y a una presión de 1 atmosfera (VER Figura 13); los valores son estimados.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

Bridgewater (2009) y Torres (2015) dan a conocer que las grandes cantidades de residuos orgánicos pueden ser reaprovechados para la generación de energía, especialmente los residuos agrícolas y residuos de depuradora, ya que según Torres (2015) manifiesta que el estiércol de ganado vacuno es el más representativo de los residuos agrícolas debido a su alta producción de heces, capacidad taponera; como también, tiene una relación ideal de 25:1 carbono y nitrógeno respectivamente, la cual es adecuada para una degradación eficaz (Mójica, Rueda, Vidal & Acosta, 2018); cabe mencionar que Vera, Martínez, Estrada & Ortiz (2015) el estiércol de ganado vacuno es considerado mejor generador de biogás a comparación del estiércol de ganado porcino. Por otro lado, los residuos de una depuradora son los lodos, quienes tienen mayor degradabilidad en condiciones tanto aeróbicas como

anaerobias para producir biogás, convirtiéndoles en excelentes sustratos para ser mezclado con otros más secos (Buendía, 2008) y Graña (2014).

En la Tabla 5, los parámetros fisicoquímicos del estiércol de ganado vacuno, lodos de PTAR y mezcla de ambos, con respecto al pH, muestran que el T1 (Estiércol de ganado vacuno) es ligeramente neutro, mientras que los otros dos (T2: Lodos de PTAR y T3: Mezcla de T1 y T2 ) son básicos, al respecto Coss y León, *et al.* (2015) aseguran que la medición del pH es esencial para determinar un medio apto para la digestión anaeróbica, así como también Ferrer & Seco (2017) definen que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al pH ocasionando disminución en su crecimiento por lo que, el intervalo adecuado para los procesos anaerobios debe estar entre 6-8, por otro lado el valor de pH del T1 (estiércol ganado vacuno) está muy relacionado con el tipo de alimento que consume el rumiante, y a su vez con los microorganismos que hidrolizan la ingesta (Ramírez, 2017); hay que tener en cuenta, que el ganado vacuno del establo donde se recogió la muestra, recibe alimento a base de alfalfa (en flor y rico en fibra) la cual tiene muchas más propiedades que mejoran la digestión en el rumen del vacuno, incrementando su pH de 5.8 y 7.0 en la actividad microbiana (Anrique, 2014). Del mismo modo, Araujo & Vergara (2007) manifiestan que la alfalfa es un vegetal fibroso que es consumida por el rumiante; la fibra es degradada durante el proceso de la fermentación a condiciones estables con respecto a la temperatura y pH; los microorganismos que se desarrollan en el medio son capaces de degradar el alimento, mediante simbiosis. Cabe mencionar que el pH ruminal dependerá de la cantidad del CO<sub>2</sub> disuelto en el medio; el cual va a reaccionar con el agua, variando las cantidades de iones H<sup>+</sup>; tomando en cuenta lo antes mencionado, uno de los factores para la disminución del pH, es la humedad en el alimento; ya que se empleará menos secreción de saliva y a la vez descenderán las

concentraciones de sales alcalinas en el rumen; otro de los factores es el excesivo consumo de carbohidratos (forrajes), que provoca el aumento de las concentraciones de ácido láctico; de acuerdo a lo antes mencionado Lijarza (2017) en su investigación da a conocer que el estiércol de vacuno tiene un pH de 7.7. Y en cuanto al pH de T2 (Lodos de PTAR), los autores Cajigas, Pérez & Torres (2005) y Camacho, Villada & Hoyos (2017) afirman que la variabilidad del pH depende de las características del agua residual, viéndose afectado por la presencia de ácido carbónico y los AGVs (ácidos grasos volátiles), según, Carhuacho & Salazar (2015) y Espejo & León (2017) las aguas residuales domesticas urbanas son provenientes de lavandería, cocina, baño, sistema de drenaje de calles y avenidas, aguas de lluvia y lixiviados, resaltando de todos estos los productos de limpieza, que tienen un alto porcentaje de sales inorgánicas con efecto contaminante, inclusive los compuestos alimenticios que son eliminados por el organismo como el amonio, nitratos y fosfatos. Del mismo modo, Espejo & León (2017) confirma que los compuestos fosforados son provenientes de los detergentes. De hecho, la alcalinidad de las aguas residuales se debe a la presencia de sales de ácidos débiles y bases fuertes los cuales impiden que el pH baje, es decir la disposición de los iones Hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ), Carbonatos ( $\text{CO}_3$ ) y Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ) (Carhuacho & Salazar, 2015). Con respecto al resultado de pH de T3 (Mezcla de T1 y T2) se consolida con lo obtenido por Bacilio (2016) quien obtuvo valores de pH 8.74 de una mezcla de estiércol de bovino con lodo, este valor según Ferrer, Palatsi, Campos & Flotats (2010) se debe a la falta de contacto entre sustratos, ya que si no existe agitación frecuente en la codigestión anaeróbico se verá afectada la producción de biogás y acumulación de AGVs (Ácidos Grasos Volátiles). Además, Velásquez, *et al.* (2018) y Buendía (2008), dan a conocer que los Lodos de PTAR tienen un pH básico con un alto contenido de población microbiana que

favorecen los procesos de metanogénesis y al ser combinado con estiércol de vacuno estabiliza el proceso anaeróbico; además, según Ballarte & Coronado (2006) la alcalinidad se debe a las altas concentraciones de fósforo, Talavera & Zapata (1998) afirman que la alta concentración de fósforo es absorbido por el calcio en el agua residual, lo cual generaría el incremento del pH.

En la Tabla 5, en cuanto a los resultados de temperatura de inicio de cada uno de los tratamientos, están dentro del rango de una temperatura mesófila, desde esta perspectiva, Fernández, *et al.* (2015) consideran que la temperatura es mesófila cuando los microorganismos se desarrollan entre un rango de 25 a 45 °C, según Hernández, *et al.* (2014) el análisis de temperatura es esencial porque provee mejores características al proceso de digestión anaeróbica, al respecto Rodríguez, *et al.* (2017) bajo condiciones mesófilas (35° C) durante 20 días obtuvieron como resultado 9.3 litros de biogás por día sosteniendo que la digestión anaerobia mesófila es una opción para el tratamiento de los excedentes de lodos de tipo biológico para la obtención de biogás con una producción importante de litros/día, de modo idéntico, Paúcar (2014) y Lijarza (2017) hacen mención que la calidad y velocidad de producción de biogás va a depender principalmente de la temperatura ya que, si más aumenta, más rápida será la degradación de la materia orgánica y alteración de la actividad enzimática, asimismo Hernández (2015) refiere que la temperatura condiciona el tiempo del proceso de la digestión anaeróbica y para una mejor producción de metano es de 35 °C, de esta manera se mantendrá la actividad de las bacterias mesófilas activa, haciendo hincapié de lo ya mencionado la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011) da a conocer que para una temperatura mesofílica el tiempo de retención varía entre 15 y 30 días. Por otro lado, López, Martínez, & Paredes (2016) enfatizan que, al realizar un seguimiento de variables

como temperatura, pH y presión se puede obtener una mayor eficiencia del proceso, como también permitirá tomar medidas correctivas necesarias en tiempo real, teniendo en cuenta que el incremento de la temperatura a 10° C lleva a una aceleración de los procesos biológicos, ya que la temperatura influye en la densidad, la solubilidad y el equilibrio ácido-base de las aguas residuales (Carhuancho & Salazar, 2015).

En la Tabla 6, con respecto a la Humedad el T1 (Estiércol de ganado vacuno) tuvo una humedad de 47%, T2 (lodos de PTAR) de 70% y T3 (Mezcla de T1 y T2) de 62.5%. De acuerdo con, Graña (2014) y Arhoun (2017) sostiene que para la producción de biogás en condiciones adecuadas es esencial un contenido de agua de 40 a 80% es decir, que un elevado contenido de agua favorece la producción de biogás debido a la aceleración que provoca en la velocidad de degradación de la materia orgánica. Tal como, Gonzales, Rustrián, Houbron, & Zamora (2008) afirman que un alto concentración de humedad incrementa la tasa de hidrólisis. En base a lo mencionado los tres tratamientos cumplen con lo señalado; asimismo, Sarabia, *et al.* (2017) en su investigación con lodos de aguas residuales obtuvieron una humedad de un 69.76% como también la investigación de Sánchez, Laines & Sosa (2015) demostraron que la humedad de lodos PTAR es de 72.81%, casos similares al valor de T2 (Lodos de PTAR) y este a su vez esta referenciado por Graña (2014) y López & Ruiz (2014) quienes garantizan que los lodos de PTAR tienen mayor contenido de humedad para actuar como disolventes frente a otros residuos más secos, además; contiene una variedad de nutrientes, los cuales son ideales para el crecimiento microbiano y una capacidad de absorción que preserva la disminución del pH ante una posible acumulación de ácidos grasos volátiles (AGVs); en cuanto al T1 (Estiércol de ganado vacuno) según Marín (2011), asegura que el consumo del

alimento del vacuno va a depender del contenido de agua, de acuerdo a su ciclo de vida, ya que en la etapa inmadura contiene un 70% a 80% de agua; mientras, más madura es la planta el porcentaje de agua será menor, según, Lijarza (2017) da a conocer que el estiércol de vacuno tiene una humedad entre un rango de 30-60%, valores que convalidan los resultados obtenidos en el trabajo; y en cuanto al T3 (Mezcla de T1 y T2), según Sarabia, *et al.* (2017) y Varnero, (2011) la codigestión de sustratos altamente biodegradables; tienen una alta solubilidad debido, a la incidencia la temperatura en las sales, y a la velocidad del crecimiento microbiano.

Con respecto a los Sólidos Totales (ST) en la Tabla 6, se muestran los porcentajes de ST de cada tratamiento: 44.68%, 28.75% y 37.72% para el T1 (Estiércol de ganado vacuno), T2 (Lodos de PTAR) y T3 (Mezcla de T1 y T2); respectivamente; resaltando que este parámetro, es esencial para determinar la capacidad de degradación de la materia orgánica evitando sobresaturar la producción de gas en un biodigestor (Fernández, *et. al.*, 2015); dado que, si el porcentaje de sólidos totales es bajo, provoca ausencia de microorganismos debido a la dilución; mientras que, si el alto el transporte de las bacterias estará aglomerado, lo que disminuirá la efectividad de la digestión anaerobia (De la Torre, 2008). Algunas investigaciones demuestran que la naturaleza de las fuentes y la cantidad de Sólidos Totales (ST) está directamente relacionada con la producción de biogás (Sarabia, *et al.* 2017 y Valdez, 2016). De tal manera que, Varnero (2011) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011), manifiestan que los porcentajes de sólidos totales variarán, de acuerdo a la materia prima que se emplea, ya que para un biodigestor tipo Bach es ideal emplear sustratos de clase 1 (el estiércol sólido y lodos de PTAR), los cuales se caracterizan por tener más de un 20% ST (Sólidos Totales), dato que cumple con los tres (03) tratamientos, como

también con Varnero (2011) y Lijarza (2017) quienes dan conocer que el estiércol de vacuno debe estar entre un rango de 13.4% y 70% ST, de la misma forma Ballarte & Coronado (2006) quienes manifiestan que los Lodos de Covicorti tienen un rango de 20% a 32% ST y en cuanto al T3 (Mezcla T1 y T2), los valores fueron intermedios con respecto al T1 y T2, produciendo mayor volumen de biogás, caso que es respaldado por García (2008) quien tuvo un valor intermedio al de los sustratos por sí solos, de 9.42% ST en la mezcla de lodos de PTAR y estiércol vacuno (50:50). Caso contrario ocurre con la codigestión tanto de Sarabia, *et al.* (2017) como de Valdez (2016), quienes mediante sus investigaciones demostraron que a mayor cantidad de sólidos totales (ST) mayor es la producción de biogás.

Referente a, los sólidos volátiles (SV) en la Tabla 6, se muestran los porcentajes de SV de cada tratamiento: 32.25%, 21.6% y 26.8% para el T1 (estiércol de ganado vacuno), T2 (lodos de PTAR) y T3 (mezcla de T1 y T2), respectivamente; el porcentaje obtenido de cada uno de los tratamientos indica el grado de biodegradabilidad del sustrato (Junta de Andalucía, 2011). Por ende, se convierte en otro de los parámetros más importantes para la producción de biogás, dado que, permite determinar el contenido de materia orgánica asimilable (Solera, *et al.* 2014) que está relacionado directamente con la producción de biogás (Sarabia, *et al.* 2017), cabe resaltar que, el sustrato estiércol de vacuno está compuesto por macromoléculas de hidratos de carbono, proteínas, lípidos y material lignocelulósico (Solera, *et al.* 2014), esta última macromolécula tiene una biodegradabilidad lenta o baja, generando un grado de inhibición en la etapa de hidrólisis Madadi, Tu & Abbas (2017) y Kato, Elia, Elythe & Lynn (2014). Es por ello que para eliminar el material lignocelulósico se debe aplicar un pretratamiento, debido a la alta resistencia de degradabilidad de los microorganismos anaeróbicos Madadi, Tu & Abbas (2017) y

Kato, Elia, Elythe & Lynn (2014), los pretratamientos según Martínez & García (2016), son físico - mecánico y térmico que buscan incrementar la degradación del sustrato, mejorando la velocidad y eficiencia de la hidrólisis con la reducción de tamaño y filtración del sustrato; ya que el tamaño de las partículas es fundamental para la disponibilidad de enzimas hidrolíticas Kato, Elía, Flythe & Lynn (2014), con respecto al T2 (lodos de PTAR), De la Torre (2008) y Martin, Esteves, & Manrique (2016) mencionan que, en una depuradora, los fangos arrastran las concentraciones restantes, esto a su vez llega a tener una gran cantidad de materia orgánica biodegradable, pero por causa de la disminución de agua y la agitación origina una sobrecarga de sólidos, obteniendo poca cantidad de biogás. De acuerdo a lo mencionado, Buendía (2008) en su investigación obtuvo un 11.10% de sólidos volátiles (SV), debido a la alta solubilidad del sustrato con un porcentaje de 83% de humedad. Asimismo, Sarabia, *et al.* (2017) y Valdez (2016) dan a conocer que a mayor cantidad de sólidos volátiles presentes en el medio mayor será la producción de biogás; caso que no se evidencia en la Figura 15 y Tabla 6, donde el T3 (Mezcla T1 y T2) tienen mayor producción de biogás con un valor intermedio de % sólidos volátiles (SV) en relación a T1 y T2, aunque estadísticamente no lo podemos probar, sin embargo García (2009) demostró que 81.83 % de sólidos volátiles (SV) con respecto a los sólidos totales (ST), fue un valor intermedio en la mezcla de 50:50 (lodos de PTAR y estiércol de vacuno).

Otro punto es, las cenizas presentándose en la Table 6, donde se muestran los porcentajes de las cenizas; con respecto al T1 (Estiércol de ganado vacuno) tiene un 24.75% Cenizas, T2 (Lodos de PTAR) tiene un 16 % Cenizas y T3 (Mezcla de T1 y T2) tiene un 21.45% Cenizas. Estos valores indican la cantidad de material biológicamente inerte que no sufre transformación durante el proceso (García, 2014).

Según Sarabia, *et al.* (2017), aseguran que los lodos contienen mayor cantidad de minerales que otros residuos, al igual que, Lijarza (2017) demostró que los lodos de PTAR contienen un alto rango de 10- 60% de cenizas; por ello que la producción de biogás en T2 (Lodos de PTAR) fue inferior al T3 (Mezcla T1 y T2), según las Figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 20, el T2 (lodos de PTAR) produjo biogás con mayor rapidez, pero obtuvo un volumen de biogás inferior tanto al T2 (lodos de PTAR) como al T3 (mezcla de T1 y T2), en la Tabla 6, el T2 tienen un alto contenido humedad 70% y material orgánica biodegradable, el cual hace aumentar su velocidad de crecimiento microbiano, ya que según Wiki (2007) menciona que los lodos de PTAR tienen un alta concentración de nitrógeno de 3-5 %; y según García (2009), manifiesta que este componente es esencial para el desarrollo bacteriano; es por ello, que si la velocidad específica de crecimiento de las bacterias acidogénicas aumentan, provoca una elevada acumulación de AGVs, un descenso de pH como también de producción volumétrica de biogás (Camacho, Villada & Hoyos, 2017). Por otro lado, Mójica, *et al.* (2018) da a conocer que el estiércol de ganado vacuno tiene un porcentaje de cenizas de superior a 19.66% y una relación de de carbono-nitrógeno de 25:1 cantidad adecuada para que se pueda degradar eficazmente y producir biogás.

En cuanto a la producción de biogás en la Figura 14 y 15 se muestra la evaluación realizada durante un lapso de 10 días, el tratamiento T3 tuvo mayor producción de biogás a comparación de T1 y T2, en la Figura 20 según Suárez, López & Álvarez (2019) resaltan la variación del Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) describe una curva característica para la producción de biogás donde se puede monitorear el crecimiento bacteriano de la digestión anaeróbica dado que, el crecimiento de los microorganismos involucrados en la digestión define la tasa de producción de biogás y la degradación del sustrato. López & Ruiz (2014) y García

(2009) dan a conocer que los sustratos por sí solos tienen una baja biodegradabilidad a comparación de una mezcla, que logra ser un gran potencial de producción de biogás, ya que aprovecha la sinergia de la mezcla, como también el equilibrio y compensación de nutrientes; con la finalidad de estabilizar el proceso anaeróbico; esta característica favoreció al T3, quien tuvo mayor producción de biogás al combinar estiércol de vacuno con lodos de PTAR (50:50), asimismo; tras la investigación de Medina (2010) y Torres, Pérez, Cajigas, Jurado, & Ortiz (2007) dan a conocer que los lodos de PTAR con estiércol de vacuno, presentan una agrupación de alta concentración de bacterias metanogénicas y ácido láctico, que estimulan la actividad metanogénica en un menor tiempo, por ello es que la cantidad de lodos de PTAR define la alcalinidad en el medio (Medina, 2010 ) y (Torres, Pérez, Cajigas, Jurado, & Ortiz, 2007); ya que los compuestos del sustrato tienen una influencia directa en la producción del biogás y su composición resultante (Suárez, López & Álvarez, 2019); lo mencionado queda respaldado por la investigación de García (2009) quien realizó varios tratamientos de mezcla a temperaturas mesofílicas y termofílicas, donde el tratamiento 50:50 (Estiércol de Vacuno: Lodos de PTAR) tuvo mayor producción volumétrica de biogás a condiciones mesofílicas, sin embargo, el autor concluyó que el tratamiento 25:75 (Estiércol de Vacuno: Lodos de PTAR) a condiciones termofílicas, tuvo mayor eficiencia en producción volumétrica de biogás, debido a la gran eficiencia de remoción de materia orgánica, ya que el incremento de producción de biogás dependerá de la cantidad de estiércol en la codigestión, el tiempo de arranque, la alta alcalinidad en el digestor por la disolución del CO<sub>2</sub>, otro de los casos similares es el de Buendía (2008) quien da a conocer que la mezcla de lodos de depuradora con estiércol de vacuno (75:25); se convierte en una potencia de producción de biogás, debido a que disminuye la fase de latencia, y por otro lado

umenta la eficiencia de reducción en un 77% SV (Sólidos Volátiles), como también el tiempo de velocidad máxima en la producción de biogás; a diferencia del tratamiento 50:50 quien tiene una eficiencia de reducción de un 61% SV (Sólidos Volátiles), Otro de los casos es el de Sánchez, Laines & Sosa (2015) quienes demostraron que el estiércol de ganado vacuno adicionadas con lodos de aguar residuales (EV+L) tienen mayor producción de biogás con un 78.63% de metano, ya que los sustratos por separado potenciaron la mezcla, con un 70% de humedad y un rango de 10 y 60% de sólidos volátiles totales.

Respecto a la cinética de producción volumétrica de biogás, en la Figura 16, 17 y 18, se presentan los datos experimentales tanto T1, como T2 y T3; los cuales fueron proyectados estadísticamente en Microsoft Excel y tuvieron un comportamiento sigmoideal a lo largo de la curva, según Parés & Kucherova (2014); en una forma sigmoideal se aprecian tres fases del crecimiento de producción acumulada de biogás; la aceleración (punto de partida cero con una velocidad de crecimiento muy rápida y positiva, hasta llegar al punto de curvatura); la desaceleración (desde el punto de curvatura hasta un punto de declive) y la lineal (el crecimiento de producción acumulada de biogás se vuelve estacionaria), de tal manera que el modelo matemático Gompertz se ajustó con un 99% de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y un bajo error normalizado (NRMSE) de forma que es eficiente para los datos experimentales durante el periodo de tiempo de 21 días. Por otro lado, en las mismas figuras, denotan que el T2 (lodos de PTAR) tiene mayor velocidad específica de crecimiento de producción volumétrica de biogás de 2.222 ml/ día<sup>-1</sup> a comparación del T1 y el T3 con 0.377 ml/ día<sup>-1</sup> y 0.3602 ml/día<sup>-1</sup> respectivamente; ello está respaldado por Buendía (2008) quien da a conocer que la reducción de sólidos volátiles condiciona a la velocidad específica de producción de biogás como

también, la fase de latencia, ya que según Rodríguez (2016) la variabilidad de la fase de latencia depende de la cantidad de sólidos volátiles, el tamaño de inóculo, la temperatura y la escasez de nutrientes en el medio; como también según Lijarza (2017) dan a conocer que la velocidad de producción de biogás es lenta debido a la presencia de material lignocelulósico que representa un 50% de sólidos volátiles en el sustrato estiércol de vacuno, como también a la variabilidad de pH con valores inferiores a 6.3 o mayores a 7.8. Una de las investigaciones que respalda lo mencionado es Buendía (2008) quien demostró estadísticamente que los Lodos de PTAR tiene mayor velocidad específica de producción de biogás como también reducción de sólidos volátiles, a comparación del estiércol de vacuno y la mezcla (lodos de PTAR: estiércol de vacuno), ya sea a una proporción de 50:50 o 75:25 respectivamente; pero otro lado, tiene una fase de latencia  $4.2 \pm 0.2$  días, el cual es menor al del estiércol de vacuno  $5.7 \pm 0.3$  días, pero mayor al de la mezcla 50:50 (lodos de PTAR: estiércol de vacuno) con  $3.1 \pm 0.1$  días, datos mencionados coinciden con dos (02) tratamientos experimentados en la investigación, ya que el T3 (Estiércol vacuno + lodos de PTAR) tiene una fase de latencia mucho más menor a lo mencionado y según Buendía (2008) cumple con el valor de la mezcla 75:25 ((lodos de PTAR: estiércol de vacuno)  $1.2 \pm 0.3$  días, siendo ello una ventaja para el arranque del proceso anaeróbico. Del mismo modo; Parra, Vásquez, Torres, Marmolejo & Torres (2019) y Luna, Mejías, Valdez, German & Santos (2018) manifiestan que para facilitar una reducción de la fase de latencia e hidrólisis se debe realizar pretratamientos térmicos a una temperatura de 80 °C durante 3 horas, el cual provoca la ruptura de la pared celular y mejora la biodegradabilidad anaeróbica entre 20% y 30%.

Con referencia al cálculo de la actividad metanogénica específica (AME) en la Figura 20 y Tabla 8, fue el T3 (estiércol de vacuno: lodos de PTAR) con un valor de 1.714 gDQO/g STV\*día; el que presentaba mayor actividad metanogénica; con respecto a los tratamientos T1 (estiércol de vacuno) y T2 (lodos de PTAR); siendo 0.607 gDQO/g STV\*día y 0.509 gDQO/g STV\*día, respectivamente. Cabe agregar que, según Ariza, Rincón, Paz & Gutierrez (2019), la actividad metanogénica específica (AME) se expresa como gramos DQO (representando la cantidad de gas producida por día) por gramos de sólidos volátiles (representa la cantidad de bacterias en el proceso); ya que, Hernández, *et al.* (2014) define que la actividad metanogénica específica (AME) condiciona la capacidad de determinar la población de microorganismos para degradar un sustrato, y , mide la concentración del sustrato a lo largo del tiempo; además la temperatura del medio tiene una influencia directa sobre la AME, parámetro esencial para el control de la eficiencia del tratamiento (Guerra, González, Trupiano, Figueroa, Saghezzo & Cuevas, 2000), según Torres & Pérez (2010) da a conocer que una baja actividad metanogénica específica es debido a la acumulación de materiales inertes, como es la lignina en la biomasa; además; la AME permite determinar el tipo de lodo mediante una cantidad de carga orgánica en el biorreactor. Guerra, González, Trupiano, Figueroa, Saghezzo & Cuevas (2000), manifiesta que los lodos de PTAR tienen un AME bajo debido a su alto contenido de sólidos volátiles totales, la presencia de material inerte y la compactibilidad del sustrato en el reactor. Mediante la investigación de Anzola, Oliveira & Zaiat (2008) definen que la actividad metanogénica específica (AME) evalúa el comportamiento de las Arqueas Metanogénicas de lodos en un reactor anaerobio, debido a la presencia de bacterias facultativas, las cuales sirven de barrera protectora para las bacterias anaerobias. Haciendo hincapié a lo mencionado, Ariza, Rincón, Paz & Gutiérrez

(2019), manifiesta que si mayor es la reducción de sólidos volátiles (SV), mayor será la actividad metanogénica en el medio, ello convalida el valor del T3 (Mezcla de T1 y T2), ya que según Buendía (2008) la mezcla de lodos de PTAR y estiércol de vacuno (50:50) tienen una reducción de 61% SV y aún más a una proporción de (75:25) con una reducción de 77% SV, siendo estos valores mayores a la reducción de sólidos volátiles (SV) de cada sustrato por separado.

#### 4.2 Conclusiones

- La mezcla del estiércol de ganado vacuno con lodos de PTAR (T3) generó mayor producción de biogás durante 21 días, así como también la mayor actividad metanogénica específica (1.714 gDQO/g STV\*día) en comparación con la producción de biogás, utilizando lodos de PTAR (T2) y estiércol de ganado vacuno (T1).
- Se determinó los parámetros físico-químicos con la finalidad de saber cuán eficiente es la degradación anaeróbica de los tres (03) tratamientos (T1: Estiércol de vacuno; T2: Lodos de PTAR y T3: Estiércol de vacuno con Lodos de PTAR) en un digestor tipo Bach, a una temperatura mesofílica, con un tiempo de retención de 21 días, un intervalo de pH entre 7.18 y 10.03, una concentración de sólidos totales mayor a un 28.75% ST y una humedad entre 47% y 70% (Ver la Tabla 5 y 6).
- La producción volumétrica acumulada de biogás se ajustó a un modelo sigmoideal de Gompertz durante los primeros 21 días de evaluación aplicando el método estadístico obteniendo un 99% de relación de producción de biogás y el tiempo.

En base a los resultados se hicieron las siguientes **recomendaciones**:

- Realizar pretratamiento físico, mecánico y térmico a los sustratos (estiércol de vacuno, lodos de PTAR y la mezcla de ambos), que consiste en la reducción de tamaño, filtración y secado; para el incremento de la codigestión anaeróbica (Luna, Mejías, Valdez, German & Santos, 2018) y (Martínez & García, 2016).
- Se recomienda establecer una evaluación de agitación intermitente cada dos (02) veces al día con una duración de dos (02) horas con la finalidad de lograr mejores mezclas homogéneas entre los sustratos, para tener mayor contacto entre microorganismos y sustrato; ya que al tener un mezclado excesivo reduce la oxidación de los AGVs (ácido grasos volátiles), como también mantiene la homogeneidad térmica y evita la adherencia de capas de sustrato en la pared del reactor; reduciendo así el tiempo de producción de biogás (Couper, Penney & Fair, 2009) y (Padilla & Rivero, 2016).
- Implementar un sistema automatizado para controlar pH, temperatura, y presión desde una computadora brindando datos precisos con el mínimo error, este sistema además de ser muy eficiente y práctico permitirá que, si la presión aumenta, el biodigestor deberá expulsar el gas almacenado, optimizando la digestión anaeróbica (López, Martínez, & Paredes, 2016).
- Hacer nuevos ensayos de mezclas de estiércol de vacuno adicionadas con lodos de aguas residuales con diferentes concentraciones en rango mesófilos, para determinar una mezcla óptima y viable para las autoridades como alternativa de tratamiento de disposición final de los lodos de PTAR y residuos de establo, con la finalidad de optimizar la producción de biogás; ya que contar con una fuente de energía renovable trae beneficios ambientales como también, disminuye las altas cantidades de residuos orgánicos y sobre todo las emisiones de gases de efecto invernadero (Buendía, 2008) y (García, 2009).

## REFERENCIAS

- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. Ciencias Químicas: Revista Digital, 46, 1-10. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Anrique, R. (2014). Composición de Alimentos para el ganado bovino. Recuperado de <http://www.consorciolechero.cl/chile/documentos/composicion-de-alimentos-para-ganado-bovino.pdf>
- Anzola, M., Oliveira, A., & Zaiat, M. (2008, abril). *Actividad metanogénica específica en un reactor anaerobio - aerobio aplicado al tratamiento de agua residual doméstica*. Asociación Interciencia: Revista Digital, 33, 284-289. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/339/33933409.pdf>
- Araujo, O., & Vergara, J. (2007, diciembre). *Propiedades físicas y químicas del rumen*. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal: Revista Digital. 15 (1), 133-140. Recuperado de <http://www.bioline.org.br/pdf?la07044>
- Arellano, L., Dorado, A., Fortuny, M., Gabriel, D., Gamisans, X., Gonzáles, A., Hernández, S., Lafuente, J., Monroy, O., Mora, M., Revash, S., & Sierra, H. (2017). Purificación y usos del biogás. Recuperado de [https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=5214609&query=BIOGAS](https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=5214609&query= BIOGAS)
- Arhoun, B. (2017). Digestión y codigestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora. (Tesis para optar título doctoral). Universidad de Málaga. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=214357>

Ariza, D., Rincón, M., Paz, C., & Gutiérrez, D. (2019, diciembre). *Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia*. Revista Colombiana Biotecnología: Revista Digital, 21 (2), 118-130. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v21n2/0123-3475-biote-21-02-118.pdf>

Bacilio, L. (2016). Influencia del lodo seco PTAR Covicorti-Trujillo en estiércol bovino para la obtención de humus orgánico, usando lombriz Roja Californiana (Tesis para optar título profesional). Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/6599/bacilio\\_ml.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/6599/bacilio_ml.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ballarte, J., & Coronado, M. (2006). Obtención de combustible líquido a partir de lodos residuales de las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de agua residual de Covicorti – Trujillo (Tesis para optar título profesional). Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9136/BallarteRamirez\\_J%20-%20CoronadoLaiza\\_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9136/BallarteRamirez_J%20-%20CoronadoLaiza_M.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Barberá, L. (2011). *Biometización en plantas industriales avanzadas. Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos*. Madrid, España: Bellisco Editorial.

Barrena, M., Gamarra, O., & Maicelo, J. (2010, agosto). *Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento*. Aporte Santiaguino: Revista Digital, 3 (1), 87-89. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/as/v3n1/a12v3n1.pdf>

BESEL, S.A. (Departamento de Energía). (2007). Biomasa: Digestores anaeróbicos. Recuperado de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Digestores\\_Anaerobios\\_A2007\\_0d62926d.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf)

Bolívar, H., & Ramírez, E. (2012). Propuesta para el diseño de un biodigestor para el aprovechamiento de la materia orgánica generada en los frigoríficos de Bogotá (Tesis para optar título profesional). Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Recuperado de <http://udistrital.edu.co:8080/documents/138588/3154083/documento+final.pdf>

Bridgewater, A., (2009). Energías alternativas. Handbook. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?id=MaFWxhkFHKAC&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.pe/books?id=MaFWxhkFHKAC&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

Buendía, I. (2008). Biotratibilidad anaerobia de aguas y residuos industriales. (Tesis para optar título profesional). Universidad De Castilla - La Mancha. Recuperado de <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=%2FJ2tWP6tEYI%3D>

Burgos, J., & García, P. (2002). El gas Natural- El recorrido de la Energía. Recuperado de [http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3Dgas\\_natural\\_1\\_4.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1158607427198&ssbinary=true](http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3Dgas_natural_1_4.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1158607427198&ssbinary=true)

Caballero, A., & Pérez, P. (2014, mayo). *El metano como materia prima: un reto vigente*. Real Sociedad Española de Química: Revista Digital, 110 (2), 131-139. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/El-metano-como-materia-prima%3A-un-reto-vigente-Caballero-P%C3%A9rez/c9ec324f0cfc8b41ed0d9f435ae15f2af561a30f>

Cajigas, A., Pérez, A., & Torres, P. (2005, abril). *Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón*

de yuca. *Scientia Et Technica: Revista Digital*, 11(27), 243-248. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911698045.pdf>

Camacho, R., Villada, H., & Hoyos, J. (2017, junio). *Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos*. Scielo: *Revista Digital* 28 (3), 29-36. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v28n3/art04.pdf>

Carhuancho, H., & Salazar, J. (2015). Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti en la ciudad de Trujillo - La Libertad. (Tesis para optar título profesional). Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3590/CarhuanchoAlcantara\\_H%20-%20SalazarEscobar\\_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1tJ82Vo94IVFUEijgWc9SMm955jjtL\\_xr6xaQZigogSn6woWL4uqpqrE0](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3590/CarhuanchoAlcantara_H%20-%20SalazarEscobar_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1tJ82Vo94IVFUEijgWc9SMm955jjtL_xr6xaQZigogSn6woWL4uqpqrE0)

Castro, L., Escalante, H., Gómez, O., & Jiménez, D. (2016, agosto). *Análisis del potencial metanogénico y energético de las aguas residuales de una planta de sacrificio bovino mediante digestión anaeróbica*. *Dyna: Revista Digital*, 83 (199), 41- 49. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49648868005>

Cedron, O., & Cribilleros, A. (2017). Diagnóstico del sistema de aguas residuales en Salaverry y propuesta de solución. (Tesis para optar título profesional). Universidad Privada Antenor Orrego. Recuperado de [http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3561/1/RE\\_ING.CIVIL\\_OLGA.CEDR%20-%20CRIBILLEROS\\_DATOS.PDF](http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3561/1/RE_ING.CIVIL_OLGA.CEDR%20-%20CRIBILLEROS_DATOS.PDF)

Chonlón, R. (2016). Estudio de factibilidad de producir biogás con residuos organicos ganaderos para satisfacer la demanda energética, caserío El Tambo, Motupe 2016

(Tesis para optar título profesional). Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/8748/chonlon\\_vr.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/8748/chonlon_vr.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (2015, noviembre). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. NOVA: Revista Digital, 13 (23), 55-81. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>

Coss y León, H., Del Campo, C., Loza, J., Durand, L., Monteros, E. & López, E. (2015, diciembre). *Tratamiento de sustrato de bovino y producción de biogás en un biodigestor continuo con lombricultura*. e-Gnosis: Revista Digital, 13, 1-16. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73040668004>

Couper, J., Penney, R., & Fair, J. (2009). *Chemical Process Equipment revised 2 Ed: Selection and Design*. Gulf Professional Publishing. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books/chemical-process-equipment-selection-and-design-revised-2nd-edition/couper/978-0-12-372506-6>

Dagnino, J. (2014). *Análisis de varianza*. Revista Chilena Anest: Revista digital, 43, 306-310. Recuperado de <http://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>

De la Torre, N. (2008). *Digestión anaerobia en comunidades rurales*. (Tesis para optar título profesional). Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. Recuperado de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC\\_Nadia\\_deLaTorre\\_Caritas.pdf;jsessionid=E424365539EF3885D6F5312CF75BAEFF?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf;jsessionid=E424365539EF3885D6F5312CF75BAEFF?sequence=1)

Decreto Supremo N° 014-2017 Vivienda “Necesidades de intervención”. (2017). Recuperado de

[https://www.proyectosapp.pe/RepositorioAPS/0/2/JER/IPC\\_NECESIDADES\\_INTERVENCION/Necesidades-de-Intervencion-DS-014-2017.pdf](https://www.proyectosapp.pe/RepositorioAPS/0/2/JER/IPC_NECESIDADES_INTERVENCION/Necesidades-de-Intervencion-DS-014-2017.pdf)

Decreto Supremo N° 014- 2017 “Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos”. (2017). Recuperado de [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/06/ds\\_014-2017-minam\\_-RRSS.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/06/ds_014-2017-minam_-RRSS.pdf)

Decreto Supremo N° 015-2017 Vivienda “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”. (2017). Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-015-2017-VIVIENDA.pdf>

Decreto Supremo N° 044 2006-AG “Reglamento técnico para los productos orgánicos”. (2006). Recuperado de [https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/jer/SUB\\_SECC/DS\\_044-2006-AG.pdf](https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/jer/SUB_SECC/DS_044-2006-AG.pdf)

Decreto Supremo N° 064-2010-EM “Política Energética Nacional del Perú”. (2010). Recuperado de <http://www2.osinerg.gob.pe/MarcoLegal/docrev/DS-064-2010-EM-CONCORDADO.pdf>

Díaz, A. (2013). Diseño de los procesos para la obtención de una harina de calidad nutricional a partir de residuos vegetales del mercado mayorista de concepción, distrito imperial, provincia cañete (Tesis para optar título profesional). Universidad Nacional Del Callao. Recuperado de [http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/1058/061.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1BD5FF3K9bWBP\\_gghuUzXuhzCfwomMg8BJnJCfp\\_zr\\_tQVV2ZNn7Z\\_2AQs](http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/1058/061.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1BD5FF3K9bWBP_gghuUzXuhzCfwomMg8BJnJCfp_zr_tQVV2ZNn7Z_2AQs)

Díaz, J. (2019). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Recuperado de

<https://www.paraninfo.es/catalogo/9788428341523/ecuaciones-y-calculos-para-el-tratamiento-de-aguas>

Díaz, M., Espital, S., & Molina, F. (2002). Digestión Anaerobia una aproximación a la tecnología. Recuperado de

[http://www.uneditorial.net/uflip/Digestion\\_Anaerobia\\_una\\_aproximacion\\_a\\_la\\_tecnologia/pubData/source/Digestion\\_anaerobia\\_unal.pdf](http://www.uneditorial.net/uflip/Digestion_Anaerobia_una_aproximacion_a_la_tecnologia/pubData/source/Digestion_anaerobia_unal.pdf)

Espejo, M., & León, L. (2017). Análisis comparativo del sistema de tratamiento de aguas residuales de Covicorti y Cortijo ante parámetros de la planta de tratamiento de Nuevo Laredo, Tamaulipas - México. (Tesis para optar título profesional).

Universidad Privada Antenor Orrego. Recuperado de [http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3596/1/RE\\_ING.CIVIL\\_MELSAR\\_ESPEJO\\_LUIS.LEON\\_AGUAS.RESIDUALES\\_DATOS.PDF?fbclid=IwAR0LA4nQ1ql8xNIfMc6wwrdsCY7uNCG5jIsdSIzzQjMf8RV8IqiHo0BFJR](http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/upaorep/3596/1/RE_ING.CIVIL_MELSAR_ESPEJO_LUIS.LEON_AGUAS.RESIDUALES_DATOS.PDF?fbclid=IwAR0LA4nQ1ql8xNIfMc6wwrdsCY7uNCG5jIsdSIzzQjMf8RV8IqiHo0BFJR)

Espinal, J., Olvera. O., Hernández, V., & Morillón, D. (2016, septiembre). *Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo*

*Cautlalpan*. Sistemas Experimentales: Revista Digital, 3 (8), 36-52. Recuperado de [http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas\\_Experimentales/vol3num8/Revista\\_de\\_Sistemas\\_Experimentales\\_V3\\_N8\\_5.pdf](http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8_5.pdf)

Fernández, J., Gutiérrez, F., Del Rio, P., San Miguel G., Bahillo, A., Sánchez, J., Ballesteros, M., Vásquez, J., Aracil, J., & Rodríguez, L. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Recuperado de

<https://books.google.com.pe/books?id=k9ISCgAAQBAJ&pg=PA355&dq=digestion%20anaerobia&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjE1or3yNLIahUGpFkKHTx8Ax0Q>

[6AEIODAE&fbclid=IwAR2zZJNsKPrI2FF1qDn2GGs2BepaDVQ8\\_VIBdXVM0vq](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.020)

[E89Zatu5GCBSD-mY#v=onepage&q&f=false](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.020)

Ferrer, I., Palatsi, J., Campos, E., & Flotats, X. (2010, octubre). *Mesophilic and thermophilic anaerobic biodegradability of water hyacinth pre-treated at 80° C*. ELSEVIER: Revista Digital, 30(10), 1763-1767. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.020>

Ferrer, P., & Seco, A. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Colombia: Alfaomega Editorial.

Flotats, X., Bonmati, A., Fernández, B., Sales, D., Aymerich, E., Irizar, I., Palatsi, J., Isidoro, L., Pérez, M., Vicent, T & Font, X., (2016). Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión anaeróbica. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=4849935&query=DIGESTORES%2B>

Gabriel, J., & Rodrigo, M. (2014). Pruebas no paramétricas. Recuperado de [http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/estadistica-ii/est2\\_t5.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias-de-la-salud/estadistica-ii/est2_t5.pdf)

García, L. (2014). Producción de biogás a partir de desechos sólidos orgánicos que se generan en el mercado central del cantón arenillas. (Tesis para optar título profesional). Universidad Técnica De Machala. Recuperado de <http://186.3.32.121/bitstream/48000/2798/3/CD0000-12-TRABAJO%20COMPLETO.pdf>

García, K. (2009). Codigestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás. (Tesis para optar título profesional). Universidad de Cádiz. Recuperado de <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/7413/VERSION%20FINAL.pdf?sequence=1>

Gonzales, G., Rustrián, E., Houbron, E., & Zamora, A. (2008, julio). *Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz, México*. Revista Latinoamericana De Recursos Humanos: Revista Digital, 4(3), 336-341. Recuperado de <https://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v4-n3-3-impacto-de-la-tasa-de-humedad-en-la-biodegradacion-de-los-residuos-solidos-urbanos.pdf>

Graña, J. (2014). La Producción de Biogás en Vertedero. Modelización y Determinación Analítica de los Parámetros Operativos de Funcionamiento mediante diferentes tipologías de Algoritmos. Recuperado de <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711568.pdf>

Guerra, R., González, S., Trupiano, A., Figueroa, M., Seghezzo, L., & Cuevas, C. (2000). *Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente: Revista Digital, 4, 25-30. Recuperado de [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/79293/Documento\\_completo.PDF-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/79293/Documento_completo.PDF-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Henríquez, O. (2011). Análisis y criterios mínimos para la aplicación de lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas en agrosistemas de la provincia de Melipilla, Región Metropolitana, Chile (Tesis para optar título profesional). Universidad de Chile. Recuperado de <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Henriquez%20Olivia.pdf>

Hernández, A. (2015). *Depuración de desinfección de aguas residuales*. Madrid, España: Garceta grupo Editorial.

Hernández, L., & Coello, S. (2012). El proceso de investigación científica. Recuperado de

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnpe/reader.action?docID=3198455&query=TIPOS+DE+INVESTIGACION>

Hernández, S., Sánchez, E., Béteau, J., & Díaz, L. (2014). *Análisis de un Proceso de*

*Tratamiento de Efluentes para Producción de Metano*. Iberoamericana de

Automática e Informática industrial: Revista Digital, 11, 236-246. Recuperado de

<https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9463/9434>

Hernández, T., García, C., Ingelmo, F., Bernal, P., Clemente, R., Cabrera, F., Madejón, E.,

Cabrera, A., & Cox, L. (2014). De Residuo a Recurso: El Camino hacia la

Sostenibilidad. III Recursos orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales.

4 residuos orgánicos en la restauración/rehabilitación de suelos degradados y

contaminados.

Recuperado

de

<https://www.researchgate.net/publication/277979032> De Residuo a recurso III

[Recursos Organicos Aspectos agronomicos y medioambientales 1 Residuos or](#)

[ganicos y agricultura intensiva](#)

Julio, I., Peláez, C., & Molina, F. (2016, enero). *Evaluación de la co-digestión anaerobia de*

*lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos*. ION: Revista

Digital,

29

(1),

63-70.

Recuperado

de

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=342046466006>

Junta de Andalucía. (2011). Estudio básico del biogás. Recuperado de

[https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio\\_basico\\_del\\_biogas\\_0.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf)

[basico\\_del\\_biogas\\_0.pdf](#)

Kato, D., Elía, N., Flythe, M., & Lynn, B. (2014). *Pretreatment of lignocellulosic biomass*

*using Fenton chemistry*. Bioresource technology: Revista Digital, 162 (1), 273-278.

Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.151>

Larios, J., Gonzáles, C., & Morales, Y. (2015, octubre). *Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú*. Revista de la facultad de ingeniería de la USIL: Revista Digital, 2 (2), 09-25. Recuperado de <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>

Lévy, J., & Varela, J. (2006) Modelización con estructuras de covarianzas en ciencias sociales. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=WEfCITGVJBgC&oi=fnd&pg=PA31&dq=El+test+de+Shapiro-Wilk+es+un+contraste+de+ajuste+que+se+utiliza+para+comprobar+si+unos+datos&ots=fqI4SUhPZv&sig=a\\_sd\\_Vq-0gonQ03DMvi-cWdgd0o#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=WEfCITGVJBgC&oi=fnd&pg=PA31&dq=El+test+de+Shapiro-Wilk+es+un+contraste+de+ajuste+que+se+utiliza+para+comprobar+si+unos+datos&ots=fqI4SUhPZv&sig=a_sd_Vq-0gonQ03DMvi-cWdgd0o#v=onepage&q&f=false)

Lijarza, Y. (2017). Producción de biogás a partir del estiércol de ganado vacuno y gallinaza durante el proceso de digestión anaerobia a escala de laboratorio (Informe de prácticas pre profesionales febrero – mayo 2017). Recuperado de [https://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades\\_academicas/PRODUCCION%20DE%20BIOGAS%20A%20PARTIR%20DEL%20ESTIERCOL%20DE%20GANADO%20VACUNO%20Y%20GALLINAZA%20DURANTE%20EL%20PROCESO%20DE%20DIGESTION%20ANAEROBIA%20A%20ESCALA%20DE%20LABORATORIO.pdf](https://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/PRODUCCION%20DE%20BIOGAS%20A%20PARTIR%20DEL%20ESTIERCOL%20DE%20GANADO%20VACUNO%20Y%20GALLINAZA%20DURANTE%20EL%20PROCESO%20DE%20DIGESTION%20ANAEROBIA%20A%20ESCALA%20DE%20LABORATORIO.pdf)

Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? Recuperado de [http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc\\_ingreso\\_gualberto\\_limon\\_trabajo\\_de\\_ingreso.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf)

- López, A., & Mendoza, C. (2018). Efecto de las diferentes concentraciones de lodos secos del PTAR – COVICORTI para el mejoramiento de suelos áridos (Tesis para optar título profesional). Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de [http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/31520/lopez\\_ca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/31520/lopez_ca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- López, A., & Ruiz, C. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir del buchón de agua mediante codigestión anaerobia con estiércol bovino (Tesis para optar título profesional). Universidad EAFIT de Medellín. Recuperado de [https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/8225/AnaMaria\\_LopezAguirre\\_Cristina\\_RuizRestrepo\\_2014.pdf?sequence=2](https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/8225/AnaMaria_LopezAguirre_Cristina_RuizRestrepo_2014.pdf?sequence=2)
- López, C., Martínez, F., & Paredes, O. (2016, octubre). *Automatización de un Proceso de Biodigestión Anaeróbica*. Revista Cubana de Ciencias Informáticas: Revista Digital, 1 (10), 1-16. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v10s1/rcci01517.pdf>
- López, J., Navarro, M., & Rad, C. (2011). Compostaje de residuos orgánicos y seguridad medioambiental. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=3219954&query=CARACTERIZACI%25C3%2593N%2BDE%2BLODOS>
- López, M. (2010). Conceptos básicos de Química Analítica y sus aplicaciones. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=3187140&query=GRAVIMETRIA>
- López, M., Pérez, A., & Canet R. (2016). Métodos para la medida de la fermentabilidad de los lodos de las estaciones depuradoras de aguas residuales. Recuperado de <http://www.ivia.gva.es/documents/161862582/162455759/Metodolog%C3%ADas+>

[de+medida+de+la+fermentabilidad+de+lodos+de+estaciones+depuradoras+de+aguas+residuales/449487fd-0372-4272-a7ed-16da50b095cd](#)

Luna, K., Mejías, N., Valdez, A., German, L., Santos, D. (2018, noviembre). *Efecto de pre-tratamientos sobre la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de la industria procesadora de mango*. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias: Revista Digital. 9(21), 1562-1580. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/329327945>

Madadi, M., Tu, Y., & Abbas, A. (2017, abril). *Recent Status on Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol Production*. Electronic Journal of Biology. Revista Digital, 13 (2), 135-143. Recuperado de <https://ejbio.imedpub.com/recent-status-on-enzymatic-saccharification-of-lignocellulosicbiomass-for-bioethanol-production.pdf>

Manobanda, S., & Heras, V. (2015). Cuantificación del metano utilizando la técnica de actividad metanogénica específica en lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba (Tesis para optar título profesional). Universidad De Cuenca. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21975/1/TESIS.pdf>

Marichal, G. (2010). Evaluación preliminar de excretas animales como inóculos para la producción de Biogás. (Tesis para optar título profesional). Universidad de la Habana. Instituto de Farmacia y Alimentos. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=3192025&ppg=33&query=biogas>

Marín, G. (2011). Sistema de producción animal II. Recuperado de [https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4783/sistemas\\_produccion\\_anim\\_al\\_ii.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4783/sistemas_produccion_anim_al_ii.pdf)

Martí, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano.

Recuperado de:

[https://books.google.com.pe/books?id=TsbrdcmKGKoc&pg=PA25&dq=parametros+de+dise%C3%B1o+de+un+biodigestor&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjju\\_PV8fHiAhXEtVvKHRRCDLMO6AEIKDAA#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.pe/books?id=TsbrdcmKGKoc&pg=PA25&dq=parametros+de+dise%C3%B1o+de+un+biodigestor&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjju_PV8fHiAhXEtVvKHRRCDLMO6AEIKDAA#v=onepage&q&f=true)

Martin, J., Esteves, A., & Manrique, S. (2016, octubre). *Influencia del porcentaje de sólidos en la producción de biogás a partir de guano caprino*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente: Revista Digital, 20, 06.09-06.18. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/95187>

Martínez, C., & García, Y. (2016, setiembre). *Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis*. Revista Ciencia Técnicas Agropecuarias: Revista Digital, 25(3), 81-92. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.34865.99688>

Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Recuperado de <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>

Medina, M. (2010). Optimización del tratamiento de residuos provenientes de rastro mediante la digestión anaeróbica para maximizar la producción de biogás (Trabajo para obtener grado de maestría). Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica de Mexico. Recuperado de <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/347/1/Optimizaci%C3%B3n%20del%20tratamiento%20de%20residuos%20provenientes%20de%20rastro%20mediante%20digesti%C3%B3n%20anaerobia%20para%20maximizar%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.pdf>

- Méndez, J., & Marchán, J. (2008). Estudio Diagnóstico Situacional de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en las EPS del Perú y Propuestas de Solución Lima: SUNASS. Recuperado de [https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro\\_ptar\\_gtz\\_sunass.pdf](https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/libro_ptar_gtz_sunass.pdf)
- Miano, A., García, J., & Duarte, P. (2015). *Correlation between morphology, hydration kinetics and mathematical models on Andean lupin (Lupinus mutabilis Sweet) grains*. LWT - Food Science and Technology: Revista Digital, 61 (2), 290-298. Recovered from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643814008214>
- Mikkelsen, S. & Cortón, E. (2009). Química bioanalítica. Métodos y teoría analítica para el laboratorio de biología molecular, farmacia y bioquímica. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortedp/reader.action?docID=3193467&query=POTENCIOM%25C3%2589TRICO#>
- Mójica, C., Rueda, B., Vidal, E. & Acosta, D. (2018, noviembre). *Caracterización fisicoquímica de excreta bovina para producir biogás, en una granja de ciudad Valles, S. L. P.* Tectzopic: Revista Digital. 4 (2), 16 - 22. Recuperado de <https://www.eumed.net/rev/tectzopic/2018/02/excreta-bovina-biogas.html>
- Montes, M., & Menéndez, J. (2010). El problema de la gestión de lodos en EDARs. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/95474/1/El%20problema%20de%20la%20gestion%20de%20lodos%20en%20EDARs.pdf>
- Moreno, A. (2015). Actividades de Riego, abonado y Tratamiento de cultivos. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=Osp3BwAAQBAJ&pg=PA108&dq=CARACTERIZACION+DEL+ESTIERCOL+DE+VACUNO+SEGUN+ALIMENTACION&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiH->

[qC7utvnAhUnKLkGHW5yBQwQ6AEIKDAA#v=onepage&q=CARACTERIZACION%20DEL%20ESTIERCOL%20DE%20VACUNO%20SEGUN%20ALIMENTACION&f=false](http://www.scielo.org.pe/pdf/rivep/v25n3/a07v25n3.pdf)

Núñez. O. (2016, junio). *Diseño y construcción de un digestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico*. Centro Azúcar: Revista Digital, 43 (2), 35-42. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2223-48612016000200004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612016000200004)

Ñaupas, H., Palacios, J., Valdivia, M., & Romero, H. (2019). Metodología de la Investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. Recuperado de: <https://books.google.com.pe/books?id=KzSjDwAAQBAJ&pg=PA17&dq=investigacion+descriptiva+simple&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjglpGm3aLqAhXZHBkGHUIwDIAQ6AEwAnoECAYQA#v=onepage&q&f=false>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011). Manual de Bigas. Recuperado de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Padilla, A., & Rivero, J. (2016, septiembre). *Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna*. Ciencia y tecnología: Revista Digital, 12 (1), 29-43. Recuperado de <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/1358/1390>

Parés, P., & Kucherova, I. (2014, mayo). *Comparación de modelos no lineales para describir curvas de crecimiento en la cabra catalana*. Rev Inv Vet Perú: Revista Digital, 25(3), 390-398. Recuperado de <http://www.scielo.org.pe/pdf/rivep/v25n3/a07v25n3.pdf>

Parra, B., Vásquez, C., Torres, W., Marmolejo, L., & Torres, P. (2019, mayo). *Efecto del pretratamiento térmico de residuos de alimentos sobre la producción de metano*.

Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica: Revista Digital, 22(1), e1220. Recuperado de <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1220>

Paúcar, L. (2014). Producción y evaluación de la calidad del biogás y biol en un biodigestor usando estiércol de codorniz de la granja V.A. VELEBIT S.AC. Ubicada en el distrito de Lurigancho-Chosica. (Tesis para optar título profesional). Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2153/P06-P3-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ramírez, R. (2017). Principios de Nutrición de rumiantes. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?id=Vv0sDwAAQBAJ&pg=PT32&dq=La+alfalfa+en+la+nutrici%C3%B3n+del+ganado&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiFm\\_WHrdrnAhUEGbkGHRluB7wQ6AEINjAC#v=onepage&q=La%20alfalfa%20en%20la%20nutrici%C3%B3n%20del%20ganado&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=Vv0sDwAAQBAJ&pg=PT32&dq=La+alfalfa+en+la+nutrici%C3%B3n+del+ganado&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiFm_WHrdrnAhUEGbkGHRluB7wQ6AEINjAC#v=onepage&q=La%20alfalfa%20en%20la%20nutrici%C3%B3n%20del%20ganado&f=false)

Resolución Ministerial N° 093-2018 VIIENDA “Protocolo de Monitoreo de Biosólidos”. (2018). Recuperado de <http://nike.vivienda.gob.pe/dgaa/Archivos/RM-093-2018-VIVIENDA.pdf>

Rivas, O., Vargas, M., & Guillén, R. (2010, marzo). *Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad*. Tecnología en Marcha: Revista Digital, 23 (1), 39-46. Recuperado de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/132/131](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132/131)

Rodríguez, J., Ventura, E., López, M., & Pérez, V. (2017, agosto). *Obtención de biogás a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaerobia mesofílica*. Energía Química y Física: Revista Digital, 4 (12), 34-43. Recuperado de

[https://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia\\_Quimica\\_y\\_Fisica/vol4num12/](https://ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol4num12/)

[Revista de Energ% C3% ADa Qu% C3% ADmica y F% C3% ADSica V4 N12 5.pdf](#)

Rodríguez, M. (2016). Variabilidad de la inactivación microbiana y de la fase de latencia de los microorganismos supervivientes a un proceso de acidificación. (Tesis para optar al grado de doctora). Universidad Computense de Madrid. Recuperado de <https://eprints.ucm.es/38768/1/T37612.pdf>

Rodríguez, R., Rodríguez, S., Monroy, O., & Ramírez, F. (2014, diciembre). *Producción de metano a partir de la mezcla del lixiviado de residuos sólidos urbanos y el agua residual municipal*. Revista Cubana Química: Revista digital, 27 (3), 243-251. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v27n3/ind03315.pdf>

Salazar, J., Amusquivar, C., Llave, J., & Rivesplata, C. (2012). *Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna*. XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente: Revista Digital, 11, 14-17. Recuperado de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/6.pdf>

Sanabria, J., Duran, M., & Gutiérrez, N. (2012). *Comparación de dos métodos de medición de Actividad Metonogénica Específica en reactores anaerobios aplicados el tratamiento de vinazas*. Ingeniería y Región: Revista Digital, 9, 75-82. Recuperado de <https://journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/777/1491>

Sanca, M. (2011). *Tipos de investigación científica*. Revista de actualización clínica: Revista Digital, 9, 621-624. Recuperado de [http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/raci/v12/v12\\_a11.pdf?fbclid=IwAR0zppyVBmU](http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/raci/v12/v12_a11.pdf?fbclid=IwAR0zppyVBmU)

Sánchez, L., Laines, J., & Sosa, J. (2015). *Producción de biogás por medio de la codigestión anaerobia con excretas de ganado vacuno, lodo y contenido ruminal*. AMICA.

Revista Digital. Recuperado de <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/190.pdf>

Sánchez, M., Correa, A., Pérez, A., Blanco, D., Cabaleiro, E., García, J., Soto, M., García, M., Diez, M., Bernal, M., Moral, R., & Carballas, T. (2016). Residuos ganaderos 1.2.

Recuperado de

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=4849939&query=CHARACTERIZACION%25C3%2593N%25BDE%25BESTIA%25C3%2589RCOL%25BDE%25VACUNO>

Sarabia, M., Laines, J., Sosa, J., & Escalante, E. (2017). *Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos*

*procedentes de una planta de aguas residuales*. En Revista Internacional de Contaminación Ambiental: Revista Digital, 33 (1) 109-116. Recuperado de

<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2017.33.01.10/46625>

Solera, R., Alvares, C., Aymerich, E., Bedmar, E., Carballa, M., Castrillón, L., Flotals, X., Front, X., López, M., Marañón, E., Prenafeta, F., Tortosa, G., & Vicent, T. (2014).

Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II. 2. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=4849931&query=Aspectos+biol%C3%B3gicos+de+la+digesti%C3%B3n+anaer%C3%B3bica+I>

I.2

Solla Nutrición Animal (s/f). Ganado de cría. Recuperado de <https://www.solla.com/productos/ganader/orde-o-extra>

Suárez, V., López, I., & Álvarez, M. (2019, marzo). *Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos*. Centro Azúcar: Revista Digital, 46

(1), 73-85. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v46n1/2223-4861-caz-46-01-73.pdf>

Talavera, V., & Zapata, L. (1998). Influencia del ph sobre los organismos acuáticos. Recuperado de [http://www.nicovita.com/extranet/Boletines/jul\\_98\\_03.pdf](http://www.nicovita.com/extranet/Boletines/jul_98_03.pdf)

Torres, A., Quipuzco, L., & Meza, V. (2015, diciembre). Influencia de la fermentación láctica (abono bokashi) en el pre-compost para la producción de biogás y biol en biodigestores tipo Batch. *Revista Anales Científicos: Revista Digital*, 76 (2). Recuperado de <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i2.791>

Torres, P., & Pérez, A. (2010, diciembre). *Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales*. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente: Revista Digital*, 9, 5-14. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434001.pdf>

Torres, P., Pérez, A., Cajigas, A., Jurado, C., & Ortiz, N. (2007, febrero). *Selección de inóculos para el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente: Revista Digital*, 6, 105-111. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231120826010>

Torres, Y., & Chaparro, T. (2015, agosto). *Actividad metanogénica específica de una solución acuosa de amoxicilina*. *Afinidad: Revista Digital*, 73 (574), 130-134. Recuperado de <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/312012/402107>

Usó, J., & Mateu, J. (2002). *Teoría del medio ambiente modelización*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=nwmQzJAIOjsC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- Valdez, B. (2016). Evaluación de la calidad de biogás y biol producido en biodigestores usando excretas de animales del parque zoológico de Huachipa (Tesis para optar Título profesional). Universidad Nacional Agraria La Molina. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2009/P06-V34-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Varnero, M. (2011). Manual de biogás. Recuperado de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Velásquez, M., Rincón, J., Guevara, P., Vargas, J., Castellanos, D., Duarte, C., Quintero, O., Duran, D., Morales, Y., Zarama, L., & Quintero, J. (2018). Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Recuperado de <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>
- Vera, I., Martínez, J., Estrada, M., & Ortiz, A. (2015, enero). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino. Ingeniería, Investigación y Tecnología: Revista Digital, 15(3), 429-436. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S140577431470352X>
- Vera, L., Ruigómez, I., González, E., Bodelón, P., & Rodríguez, J. (2014, diciembre). *Biorreactores de membrana anaerobios para tratamiento de aguas residuales domésticas. Estudio preliminar*. Avances en Ciencias e Ingeniería: Revista Digital, 5 (4), 1-15. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/3236/323632812001.pdf>
- Wiki. (2007). *Ingeniería de aguas residuales*. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upnortesp/reader.action?docID=3174796&query=LODOS%252BDE%252BAGUAS%252BRESIDUALES>

**ANEXOS**

ANEXO n° 1: Matriz de consistencia.

<b>“BIOGÁS A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DE LODOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO DE LA CIUDAD DE TRUJILLO, 2020”</b>				
<b>PROBLEMA</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>VARIABLE 1</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
¿Se producirá biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020?	H: Si se produce biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.	Determinar la producción de biogás a partir de la biodigestión de lodos del tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	<b>Diseño</b>
				Descriptivo Simple <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 10px 0;">M - O</div> Donde: M = Lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales con estiércol de ganado vacuno. O = La producción diaria de volumen de biogás durante 21 días.
				<b>Población</b>
				Los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales y estiércol de ganado vacuno de un establo.

		<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>		<b>Muestra</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar los parámetros fisicoquímicos de los lodos del tratamiento de aguas residuales y del estiércol de ganado vacuno de la ciudad de Trujillo, 2020.</li> <li>• Determinar la cinética de producción volumétrica de biogás de la ciudad de Trujillo, 2020.</li> <li>• Calcular la Actividad Metanogénica Específica de la ciudad de Trujillo, 2020.</li> </ul>		<p>2400 ml de lodo de una planta de tratamiento de aguas residuales y estiércol de ganado vacuno.</p>

ANEXO n° 2: Matriz de operacionalización.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	El biogás es un gas compuesto de metano, CO <sub>2</sub> y otros componentes producto de la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Arellano, <i>et al.</i> , 2017, pág. 19).	Para medir esta variable es importante tener en cuenta las siguientes dimensiones: Volumen diario de biogás producido durante 21 días.	Volumen por unidad de tiempo	[ml/día]	RAZÓN
			Masa por unidad de tiempo	[g DQO/gSTV*día]	RAZÓN

ANEXO n° 3: Producción acumulada de biogás en volumen en 21 y 10 días.

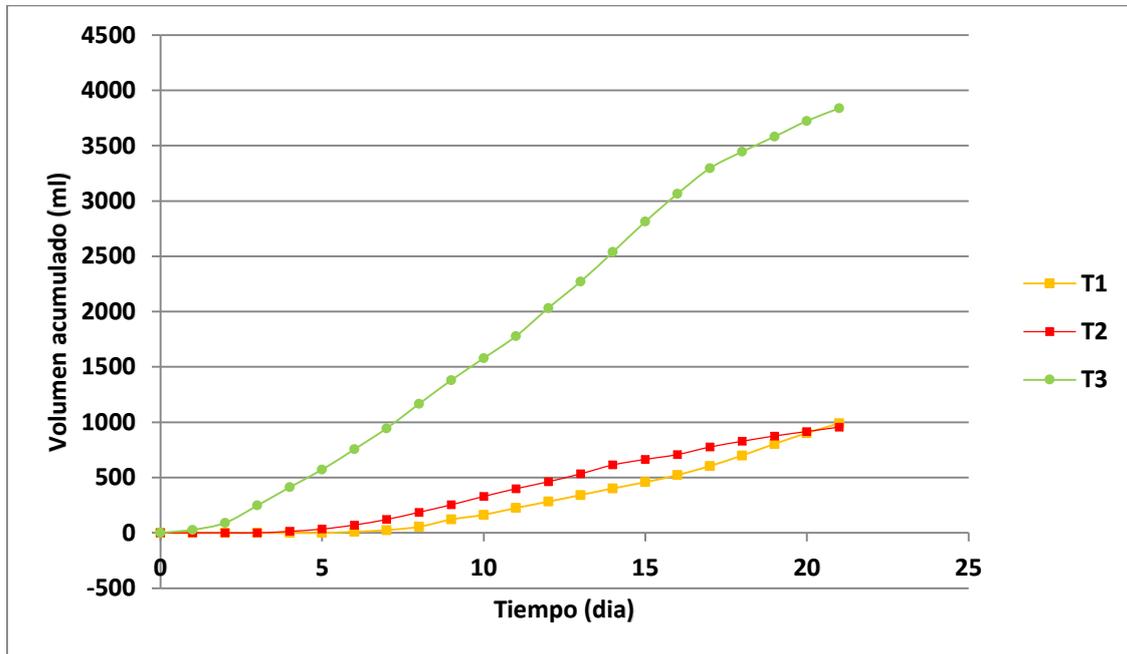


Figura 19: Volumen de metano acumulado producido en cada tratamiento empleando lodos de PTAR y estiércol de ganado vacuno durante 21 días.

Tabla 9:

*Producción promedio de biogás en 10 días.*

Días	T1	T2	T3
8	30	65	220
9	66	68	215
10	42	75	198
11	62	70	200
12	57	63	254
13	60	72	239
14	60	80	267
15	56	50	275
16	65	44	252
17	81	68	230

ANEXO n° 4. Producción del volumen de biogás expresada pendientes para hallar las velocidades de cada tratamiento.

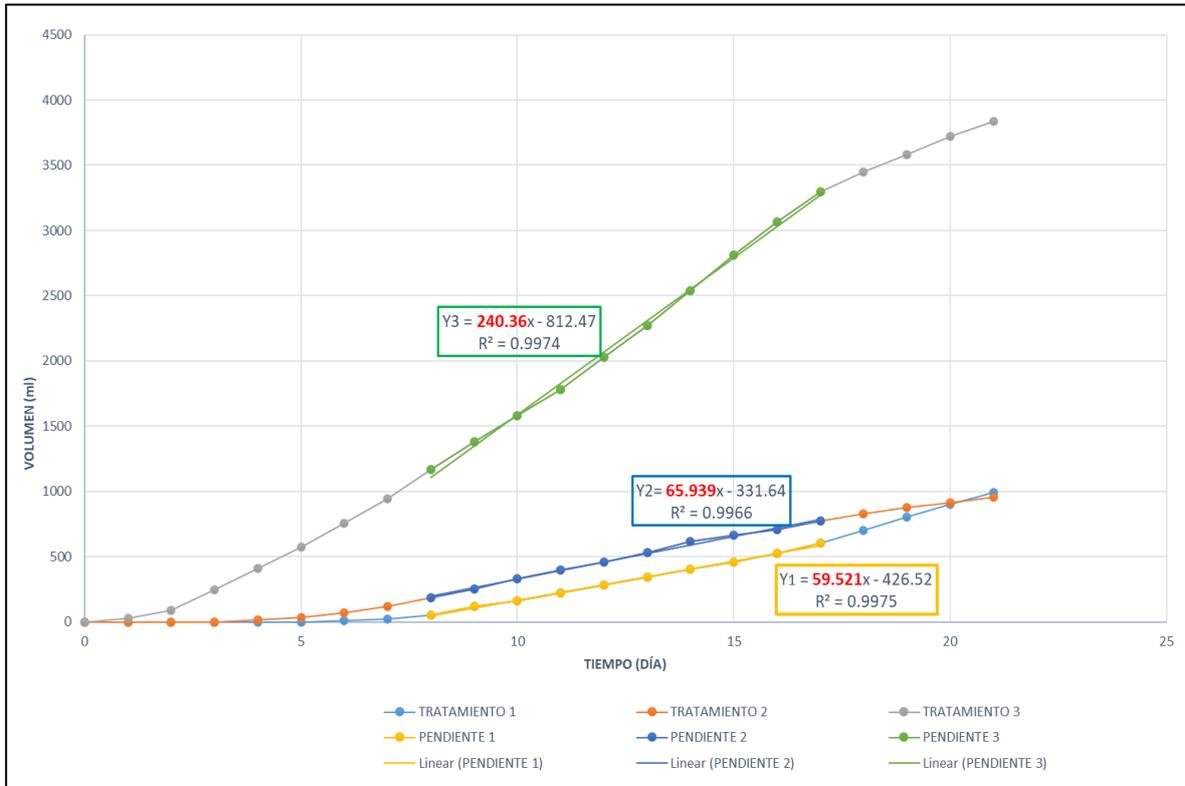


Figura 20: Pendientes del volumen de metano acumulado producido en cada tratamiento empleando lodos de PTAR y estiércol de ganado vacuno.

ANEXO n° 5: Análisis estadístico de los tres tratamientos para diferenciar su producción volumétrica de metano durante 10 días.

#### Shapiro-Wilk Test

	T1	T2	T3
W-stat	0.9211043	0.91035864	0.95193786
p-value	0.36625737	0.28346361	0.69145866
alpha	0.05	0.05	0.05
normal	yes	yes	yes

ANOVA: Single Factor

DESCRIPTION				Alpha		0.05		
Groups	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper
T1	10	579	57.9	190.1	1710.9	5.8782	45.8389	69.9611
T2	10	655	65.5	120.5	1084.5	5.8782	53.4389	77.5611
T3	10	2350	235	726	6534	5.8782	222.9389	247.0611

ANOVA

Sources	SS	df	MS	F	P value	F crit	RMSSE	Omega Sq
Between Grc	200508.07	2	100254.03	290.143	5.592E-19	3.354	5.386	0.951
Within Group	9329.4	27	345.533					
Total	209837.47	29	7235.775					

Q TEST

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	x-crit	Cohen d
T1	T2	7.6	5.878	1.293	-13.009	28.209	0.636	20.609	0.409
T1	T3	177.1	5.878	30.128	156.491	197.709	2.3315E-15	20.609	9.527
T2	T3	169.5	5.878	28.835	148.891	190.109	2.3315E-15	20.609	9.119

ANEXO n° 6: Análisis estadístico de los parámetros pH en cada tratamiento.

Tabla 10:

*Valores iniciales de pH en el T1, T2 y T3*

PH inicial		
ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA
7.25	10.02	8.88
7.1	10.03	8.85
7.2	10.03	8.88

Tabla 11:

*Descripción estadística del parámetro pH en el T1, T2 y T3*

	ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA
Mean	7.183333333	10.0266667	8.87
Standard Error	0.044095855	0.003333333	0.01
Median	7.2	10.03	8.88
Mode	#N/A	10.03	8.88
Standard Deviation	0.076376262	0.0057735	0.01732051
Sample Variance	0.005833333	3.3333E-05	0.0003
Kurtosis	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Skewness	-0.93521953	-1.73205081	-1.73205081
Range	0.15	0.01	0.03
Maximum	7.25	10.03	8.88
Minimum	7.1	10.02	8.85
Sum	21.55	30.08	26.61
Count	3	3	3
Geometric Mean	7.183062037	10.0266656	8.86998872
Harmonic Mean	7.182790142	10.0266644	8.86997743
AAD	0.055555556	0.004444444	0.013333333
MAD	0.05	0	0
IQR	0.075	0.005	0.015

Tabla 12:

*Efecto multiplicador de 2.2 para el parámetro pH.*

Multiplier	2.2		
	<i>ESTIÉRCOL</i>	<i>LODO</i>	<i>MEZCLA</i>
Min	7.1	10.02	8.85
Q1-Min	0.05	0.005	0.015
Med-Q1	0.05	0.005	0.015
Q3-Med	0.025	0	0
Max-Q3	0.025	0	0
Mean	7.18333333	10.0266667	8.87
Min	7.1	10.02	8.85
Q1	7.15	10.025	8.865
Median	7.2	10.03	8.88
Q3	7.225	10.03	8.88
Max	7.25	10.03	8.88
Mean	7.18333333	10.0266667	8.87
Grand Min	0		
Outliers	None	None	None

Tabla 13:

*Aplicación del Test Shapiro-Wilk al parámetro pH.*

	<i>ESTIÉRCOL</i>	<i>LODO</i>	<i>MEZCLA</i>
W-stat	0.96428571	0.75	0.75
p-value	0.63688588	-8.5715E-07	-8.5715E-07
Alpha	0.05	0.05	0.05
Normal	yes	no	no

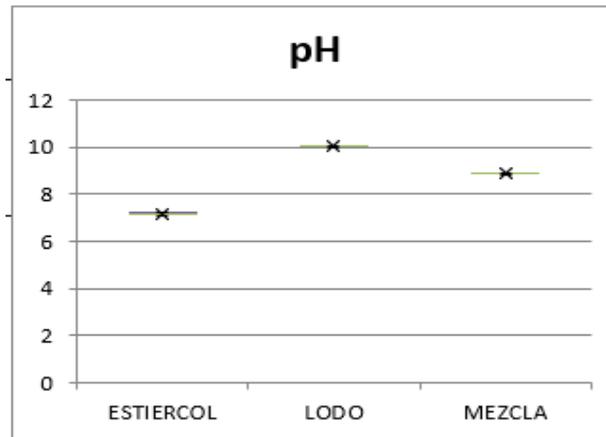


Figura 21: Diagrama de las diferencias de pH en el T1, T2 y T3.

Tabla 14:

Aplicación del Test- Kruskal Wallis debido a que el parámetro es no paramétrico.

	ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA	
Median	7.2	10.03	8.88	
rank sum	6	24	15	
Count	3	3	3	9
r <sup>2</sup> /n	12	192	75	279
H-stat				7.2
H-ties				7.3220339
Df				2
p-value				0.02570636
Alpha				0.05
Sig				Yes

NEMENYI TEST				alpha	0.05
group	R sum	size	R mean	q-crit	
ESTIERCOL	6	3	2		
LODO	24	3	8		
MEZCLA	15	3	5		
		9			3.3245

Q TEST						
group 1	group 2	R mean	std err	q-stat	p-value	R-crit
ESTIERCOL	LODO	6	1.58113883	3.79473319	0.02057293	5.25649604
ESTIERCOL	MEZCLA	3	1.58113883	1.8973666	0.37281555	5.25649604
LODO	MEZCLA	3	1.58113883	1.8973666	0.37281555	5.25649604

ANEXO n° 7: Análisis estadístico de los parámetros Temperatura en cada tratamiento.

Tabla 15:

*Valores iniciales de Temperatura en el T1, T2 y T3*

Temperatura inicial (°C)		
ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA
25.9	29	28
26.4	31	29
25.4	30	28.5

Tabla 16:

*Descripción estadística del parámetro Temperatura en el T1, T2 y T3*

	ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA
Mean	25.9	30	28.5
Standard Error	0.28867513	0.57735027	0.28867513
Median	25.9	30	28.5
Mode	#N/A	#N/A	#N/A
Standard Deviation	0.5	1	0.5
Sample Variance	0.25	1	0.25
Kurtosis	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Skewness	6.3949E-14	0	0
Range	1	2	1
Maximum	26.4	31	29
Minimum	25.4	29	28
Sum	77.7	90	85.5
Count	3	3	3
Geometric Mean	25.8967821	29.9888848	28.4970757
Harmonic Mean	25.8935642	29.9777695	28.4941514
AAD	0.33333333	0.66666667	0.33333333
MAD	0.5	1	0.5
IQR	0.5	1	0.5

Tabla 17:

*Efecto multiplicador de 2.2 para el parámetro Temperatura °C en cada tratamiento.*

Multiplier	2.2		
	<i>ESTIÉRCOL</i>	<i>LODO</i>	<i>MEZCLA</i>
Min	25.4	29	28
Q1-Min	0.25	0.5	0.25
Med-Q1	0.25	0.5	0.25
Q3-Med	0.25	0.5	0.25
Max-Q3	0.25	0.5	0.25
Mean	25.9	30	28.5
Min	25.4	29	28
Q1	25.65	29.5	28.25
Median	25.9	30	28.5
Q3	26.15	30.5	28.75
Max	26.4	31	29
Mean	25.9	30	28.5
Grand Min	0		
Outliers	None	None	None

Tabla 18:

*Aplicación del Test Shapiro-Wilk al parámetro Temperatura °C, ya que es paramétrico*

	<i>ESTIÉRCOL</i>	<i>LODO</i>	<i>MEZCLA</i>
W-stat	1	1	1
p-value	0.99999898	0.99999898	0.99999898
alpha	0.05	0.05	0.05
normal	yes	yes	yes

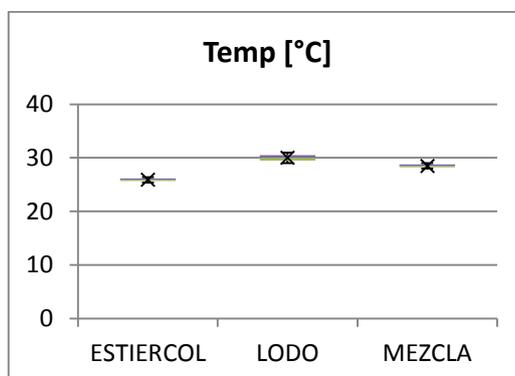


Figura 22: Diagrama de las diferencias de Temperatura en el T1, T2 y T3.

Anexo n° 08: Aplicación del ANOVA para cada tratamiento.

Tabla 19:

*Factor simple de ANOVA para el T1, T2 y T3.*

ANOVA: Single Factor								
DESCRIPTION	Alpha					0.05		
Group	Count	Sum	Mean	Variance	SS	Std Err	Lower	Upper
ESTIERCOL	3	77.7	25.9	0.25	0.5	0.4082	24.9011	26.8989
LODO	3	90	30	1	2	0.4082	29.0011	30.9989
MEZCLA	3	85.5	28.5	0.25	0.5	0.4082	27.5011	29.4989

ANOVA								
Sources	SS	df	MS	F	P value	F crit	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	25.82	2	12.91	25.82	<b>0.001128</b>	5.143253	2.933712	0.846521
Within Groups	3	6	0.5					
Total	28.82	8	3.6025					

TUKEY HSD/KRAMER					
			Alpha		0.05
Group	mean	n	ss	Df	q-crit
ESTIERCOL	25.9	3	0.5		
LODO	30	3	2		
MEZCLA	28.5	3	0.5		
		9	3	6	4.339

Q TEST									
group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
ESTIÉRCOL	LODO	4.1	0.40825	10.04291	2.32861	5.87139	<b>0.00096</b>	1.77139	5.79828
ESTIÉRCOL	MEZCLA	2.6	0.40825	6.36867	0.82861	4.37139	<b>0.00972</b>	1.77139	3.67696
LODO	MEZCLA	1.5	0.40825	3.67423	0.27139	3.27139	0.09011	1.77139	2.12132

ANEXO n° 9: Desviación estándar de los parámetros pH y Temperatura °C.

Tabla 20:

*Valores iniciales tomados por triplicado de los parámetros pH y Temperatura °C.*

SUSTRATO	PARÁMETRO	M 1	M 2	M 3	PROMEDIO	Desv est	CV
ESTIÉRCOL	PH	7.25	7.1	7.2	7.18	0.07637626	1.06%
	TEM. INICIAL (°C)	25.9	26.4	25.4	25.90	0.5	1.93%
LODO	PH	10.02	10.03	10.03	10.03	0.0057735	0.06%
	TEM. INICIAL (°C)	29	31	30	30.00	1	3.33%
MEZCLA	PH	8.88	8.85	8.88	8.87	0.01732051	0.20%
	TEM. INICIAL (°C)	28	29	28.5	28.50	0.5	1.75%

Tabla 21:

*Análisis estadístico final de los parámetros pH y Temperatura °C*

	ESTIÉRCOL	LODO	MEZCLA
pH	7.18±0.08 <sup>c</sup>	10.03±0.01 <sup>d</sup>	8.87±0.02 <sup>cd</sup>
Temp [°C]	25.90±0.50 <sup>b</sup>	30.00±1.00 <sup>a</sup>	28.50±0.50 <sup>a</sup>

ANEXO n° 10: Estadística descriptiva para la bondad de ajuste del T1 (Estiércol de ganado vacuno).

Tabla 22:

*Estadística descriptiva del Tratamiento 1.*

Día	Vol	Vol_e	$(Vol-Vol_e)^2$
1	0	8.77535752	77.0068996
2	0	11.6992118	136.871557
3	0	15.7664483	248.580894
4	0	21.4393788	459.646962
5	0	29.3508734	861.47377
6	10	40.3462054	920.892181
7	25	55.5163594	931.248192
8	55	76.2046652	449.637824
9	121	103.959985	290.362097
10	163	140.404797	510.543193
11	225	186.992892	1444.54025
12	282	244.657543	1394.45909
13	342	313.399826	817.96994
14	402	391.926944	101.466459
15	458	477.491426	379.915691
16	523	566.064791	1854.57622
17	604	652.883187	2389.56592
18	700	733.254767	1105.87951
19	804	803.393007	0.36844062
20	902	861.013918	1679.85892
21	991	905.530171	7305.09175
Promedio	314.62		
Desv. estándar	328.27		
Cv (%)	104%		

ANEXO n° 11: Estadística descriptiva para la bondad de ajuste del T2 (Lodos de PTAR).

Tabla 23:

*Estadística descriptiva del Tratamiento 2.*

Día	Vo2	Vo2_e	$(Vo2-Vo2_e)^2$
1	0	4.13487403	17.0971833
2	0	8.57589466	73.5459693
3	0	16.589651	275.216519
4	14	30.0055559	256.177819
5	34	50.8911643	285.311432
6	71	81.2098578	104.241197
7	121	122.377666	1.89796398
8	186	174.841866	124.503948
9	254	237.820899	261.763322
10	329	309.301612	388.026482
11	399	386.303873	161.191645
12	462	465.334919	11.1216854
13	534	542.90495	79.2981425
14	614	615.976656	3.90716859
15	664	682.263737	333.564104
16	708	740.35141	1046.61371
17	776	789.661196	186.62827
18	828	830.310144	5.33676394
19	876	862.920196	171.081274
20	916	888.42377	760.448462
21	956	907.895416	2314.05098
Promedio	416.29		
Desv estándar	344.55		
Cv (%)	83%		

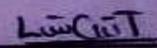
ANEXO n° 12: Estadística descriptiva para la bondad de ajuste del T3 (Mezcla del T1 y T2).

Tabla 24:

*Estadística descriptiva del Tratamiento 3.*

Día	Vo3	Vo3_e	(Vo3-Vo3_e)^2
1	28	175.6850074	21810.8614
2	90	235.131426	21063.1308
3	247.5	312.1168259	4175.33419
4	412.5	410.1165881	5.68065215
5	571.5	532.4315543	1526.34345
6	755.5	681.7444132	5439.88658
7	945.5	859.5910484	7380.34797
8	1165.5	1065.823496	9935.40547
9	1380.5	1298.176376	6777.1791
10	1578.5	1552.062195	698.957526
11	1778.5	1820.698504	1780.71373
12	2032.5	2095.607741	3982.58693
13	2271.5	2367.441361	9204.74471
14	2538.5	2626.991078	7830.67095
15	2813.5	2866.194024	2776.66012
16	3065.5	3078.937446	180.564948
17	3295.5	3261.523203	1154.42271
18	3445.5	3412.741843	1073.09685
19	3581.5	3533.598339	2294.56914
20	3723.5	3626.797773	9351.32079
21	3837.5	3696.125095	19986.8637
Promedio	1883.74		
Desv estándar	1296.73		
Cv (%)	69%		

ANEXO n° 13: Etiqueta del envase de muestreo del estiércol de ganado vacuno

8.1 Etiqueta del envase de muestra			
Nombre del productor o comercializador del lodo/biosólido/estiércol	Dignares Zargosa Lyán Gurreaero Establo «San José»		
Denominación de la unidad <sup>1)</sup> donde se toma de muestra:	Establo «SAN JOSE»		
Ubicación georeferenciado del punto de muestreo:	Zona: 17 SUR	Este:	Norte:
Nº de muestra (orden de toma de muestra):	1		
Fecha y hora de la toma:	12-05-19 10:50 am		
Tipo de muestra:	<input checked="" type="checkbox"/> puntual <input type="checkbox"/> compuesta		
Preservación:	<input type="checkbox"/> Enfriamiento insitu <input checked="" type="checkbox"/> Conservación en caja térmica con hielo <input type="checkbox"/> Otra		
Parámetros físicos <sup>2)</sup> :	<input checked="" type="checkbox"/> ST <input type="checkbox"/> Cd <input type="checkbox"/> Hg <input type="checkbox"/> Zn	<input checked="" type="checkbox"/> STV <input type="checkbox"/> Cu <input type="checkbox"/> Ni <input type="checkbox"/> N	<input type="checkbox"/> Ar <input type="checkbox"/> Cr <input type="checkbox"/> Pb
Parámetros biológicos <sup>3)</sup> :	<input type="checkbox"/> CTT	<input type="checkbox"/> Salmonelas	<input type="checkbox"/> HH
Otros parámetros:	Humedad - cenizas		
Operador de la toma de muestra (nombre/firma):	Eiseth Custodio Toledo 		



ANEXO n° 15: Cadena de Custodia para el transporte del estiércol de vacuno.

**8.2 Protocolo de transporte – Cadena de custodia**

Nombre del productor o comercializador del lodo/biosólido: Digmares Zargosa Lujan Burroonero – Establo "San José"

N° de muestra	Tiempo de la toma		Muestra			Tipo de frasco	Parámetros a medir <sup>1)</sup>											Observaciones			
	Hora	Fecha	Volumen	Condición física	Conservación	Material	ST	STV	Ar	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	N		CTT	Salm	HH
1	12/05	10:50 AM	1.5 Kg	Sólido	Con hielo	Bolsa de Plástico	/														
2	12/05	10:55 AM	1.5 Kg	Sólido	Con hielo	Bolsa de Plástico		/													
3	12/05	11:00 AM	1.5 Kg	Sólido	Con hielo	Bolsa de Plástico			/												

Responsable del productor				Operador de la toma de muestra			
Nombre / Apellido	Institución	Hora / Fecha	Firma	Nombre/ Apellido	Institución	Hora / Fecha	Firma
<u>Digmares Lujan Burroonero</u>	<u>Establo San José</u>	<u>11:10 am 12-05-19</u>	<u>[Firma]</u>	<u>Janeth Santos Campos</u>	<u>UPN</u>	<u>11:10 am 12/05/19</u>	<u>[Firma]</u>

Custodia de la muestra				Recepción de la muestra en el laboratorio			
Nombre/ Apellido	Institución	Hora / Fecha	Firma	Nombre/ Apellido	Institución	Hora / Fecha	Firma

1) ST: Sólidos totales, STV: Sólidos totales volátiles, Ar: Arsénicos, Cd: Cadmio, Cu: Cobre, N: Nitrógeno total, Cr: Cromo, Hg: Mercurio, Ni: Níquel, Zn: Zinc, Pb, Plomo, CTT: Coliformes termotolerantes, HH: Huevos de helmintos viables

ANEXO n° 16: Ficha de análisis en el laboratorio Análisis Instrumental de los parámetros de pH y Temperatura.

Formato de Análisis en Laboratorio

Responsable del análisis	Janeth Roxana Santos Campos
Numero de ID Card	N00144804

Laboratorio	Análisis Instrumental
-------------	-----------------------

Parámetro	Sólidos totales
N.º Total de muestras	2 (DOS)
Características y Presentación de las muestras	Estiércol de ganado de vacuno y lodos de una PTAR en base húmeda

Datos de control	Día	Mes	Año	Hora
Fecha/Hora de Muestreo del estiércol y lodo	12	05	2019	9:00
Fecha/Hora de Inicio Análisis	12	05	2019	10:30
Fecha/Hora de Fin de Análisis	13	05	2019	16:00
	13	05	2019	17:30

Nombre de Equipo	Cocina Eléctrica	Balanza eléctrica analítica
Marca	OHAUS,	FINEZZA
Modelo	Metrotec	

ÍTEM	MUESTRA (Tipo de Muestra)	UNIDADES	PESO CRISOL INICIAL	PESO DEL SUSTRATO	PESO CRISOL + SUS. FINAL	%					
1	E1	Gramos	51.60	5	53.8340	44.68					
2	L1	Gramos	47.99	5	49.4275	28.75					
3	M1	Gramos	52.76	5	54.646	37.72					
4											

FIRMA RESPONSABLE DEL ANÁLISIS



FIRMA RESPONSABLE



ANEXO n° 17: Ficha de análisis en el laboratorio Análisis Instrumental del parámetro sólidos totales.

Formato de Análisis en Laboratorio

Responsable del análisis	Janeth Roxana Santos Campos
Numero de ID Card	N00144804

Laboratorio	Análisis Instrumental
-------------	-----------------------

Parámetro	Sólidos totales
N.º Total de muestras	2 (DOS)
Características y Presentación de las muestras	Estiércol de ganado de vacuno y lodos de una PTAR en base húmeda

Datos de control	Día	Mes	Año	Hora
Fecha/Hora de Muestreo del estiércol y lodo	12	05	2019	9:00
	12	05	2019	10:30
Fecha/Hora de Inicio Análisis	13	05	2019	16:00
Fecha/Hora de Fin de Análisis	13	05	2019	17:30

Nombre de Equipo	Cocina Eléctrica	Balanza eléctrica analítica
Marca	OHAUS,	FINEZZA
Modelo	Metrotec	

ÍTEM	MUESTRA (Tipo de Muestra)	UNIDADES	PESO CRISOL INICIAL	PESO DEL SUSTRATO	PESO CRISOL + SUS. FINAL	%					
1	E1	Gramos	51.60	5	53.8340	44.68					
2	L1	Gramos	47.99	5	49.4275	28.75					
3	M1	Gramos	52.76	5	54.646	37.72					
4											

FIRMA RESPONSABLE DEL ANÁLISIS



FIRMA RESPONSABLE



ANEXO n° 18: Ficha de análisis en el laboratorio Análisis Agroindustrial de los parámetros sólidos volátiles y cenizas.

Formato de Análisis en Laboratorio

Responsable del análisis	Liseth Julisa Custodio Toledo	Datos de control				
Numero de ID Card	N00073138	Fecha/Hora de Muestreo del estiércol y lodo	Día	Mes	Año	Hora
Laboratorio	Análisis Agroindustrial	12 05 2019	12	05	2019	9:00
Parámetro	Sólidos Volátiles y Cenizas	Fecha/Hora de Inicio Análisis	13	05	2019	10:30
N.º Total de muestras	2 (DOS)	Fecha/Hora de Fin de Análisis	13	05	2019	16:40
Características y Presentación de las muestras	Estiércol de ganado de vacuno y lodos de una PTAR en base húmeda serán sometidos a 550 °C y 700 °C.	Nombre de Equipo	Mufla			
		Marca	YAMATO			
		Modelo	FO110CR			

ÍTEM	MUESTRA (Tipo de Muestra)	UNIDADES	PESO CRISOL INICIAL	PESO DEL SUSTRATO	PESO CRISOL + SUS. FINAL	%						
1	E1	Gramos	19.81	5	21.4225	32.25						
2	L1	Gramos	16.97	5	18.0500	21.6						
3	M1	Gramos	19.43	5	20.7700	26.8						
4	E1	Gramos	19.81	5	21.0475	24.75						
5	L1	Gramos	16.97	5	17.77	16						
6	M1	Gramos	19.43	5	20.5025	21.45						

FIRMA RESPONSABLE DEL ANÁLISIS	FIRMA RESPONSABLE
	

ANEXO n° 19: Ficha de análisis en el laboratorio Análisis Agroindustrial del parámetro humedad

Formato de Análisis en Laboratorio

Responsable del análisis	Liseth Julisa Custodio Toledo
Numero de ID Card	N00073138

Laboratorio	Análisis Agroindustrial
-------------	-------------------------

Parámetro	Humedad
N.º Total de muestras	2 (DOS)
Características y Presentación de las muestras	Estiércol de ganado de vacuno y lodos de una PTAR en base húmeda

Datos de control	Día	Mes	Año	Hora
Fecha/Hora de Muestreo del estiércol y lodo	12	05	2019	9:00
	12	05	2019	10:30
Fecha/Hora de Inicio Análisis	13	05	2019	16:00
Fecha/Hora de Fin de Análisis	13	05	2019	16:30

Nombre de Equipo	Balanza determinadora de humedad
Marca	OHAUS
Modelo	MB49

ÍTEM	MUESTRA (Tipo de Muestra)	UNIDADES	Temperatura (°C)	PESO DEL SUSTRATO INICIAL	PESO DEL SUSTRATO FINAL	%						
1	E1	Gramos	105	2	1.06	47						
2	L1	Gramos	105	2	0.6	70						
3	M1	Gramos	105	2	0.746	62.7						

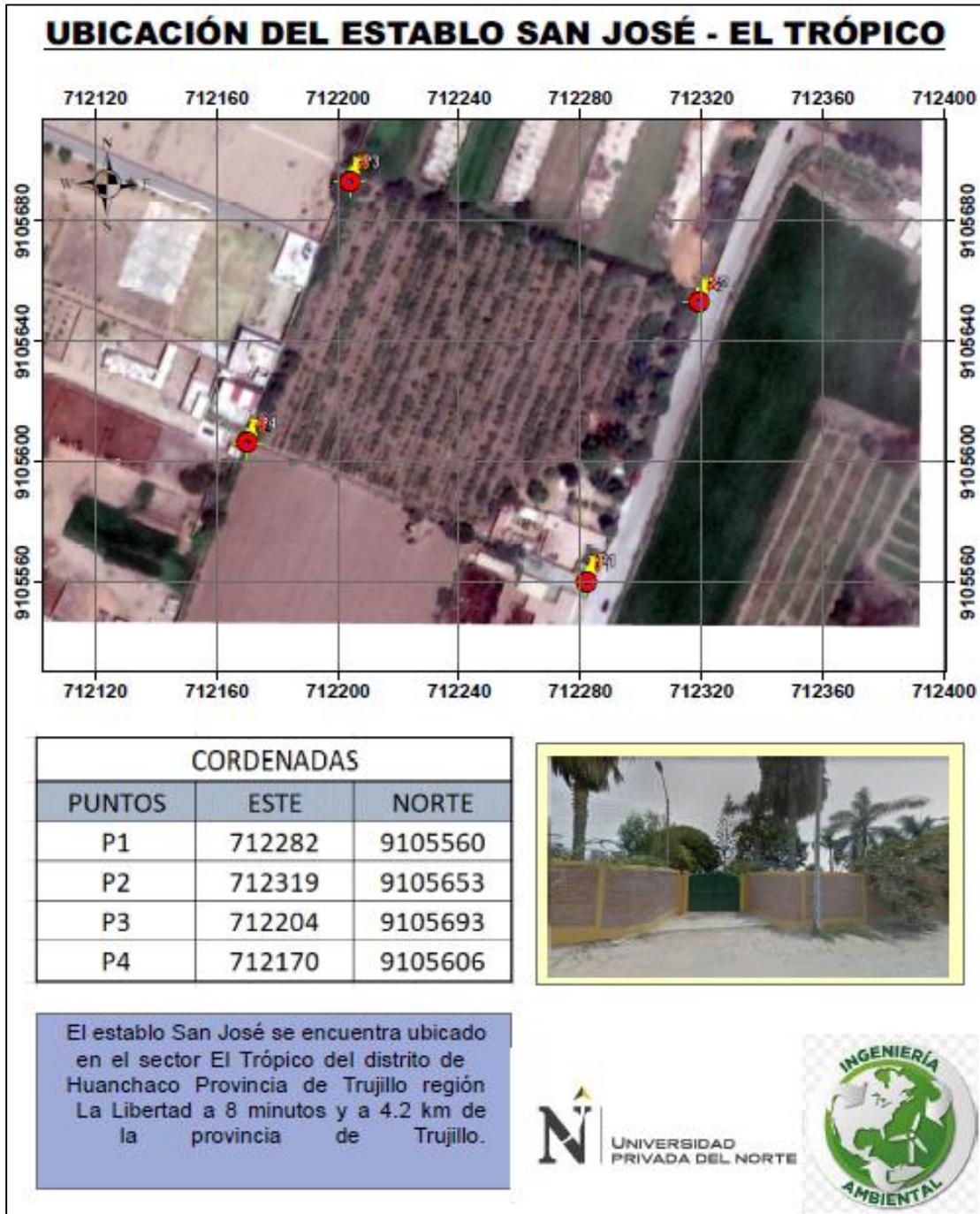
FIRMA RESPONSABLE DEL ANÁLISIS



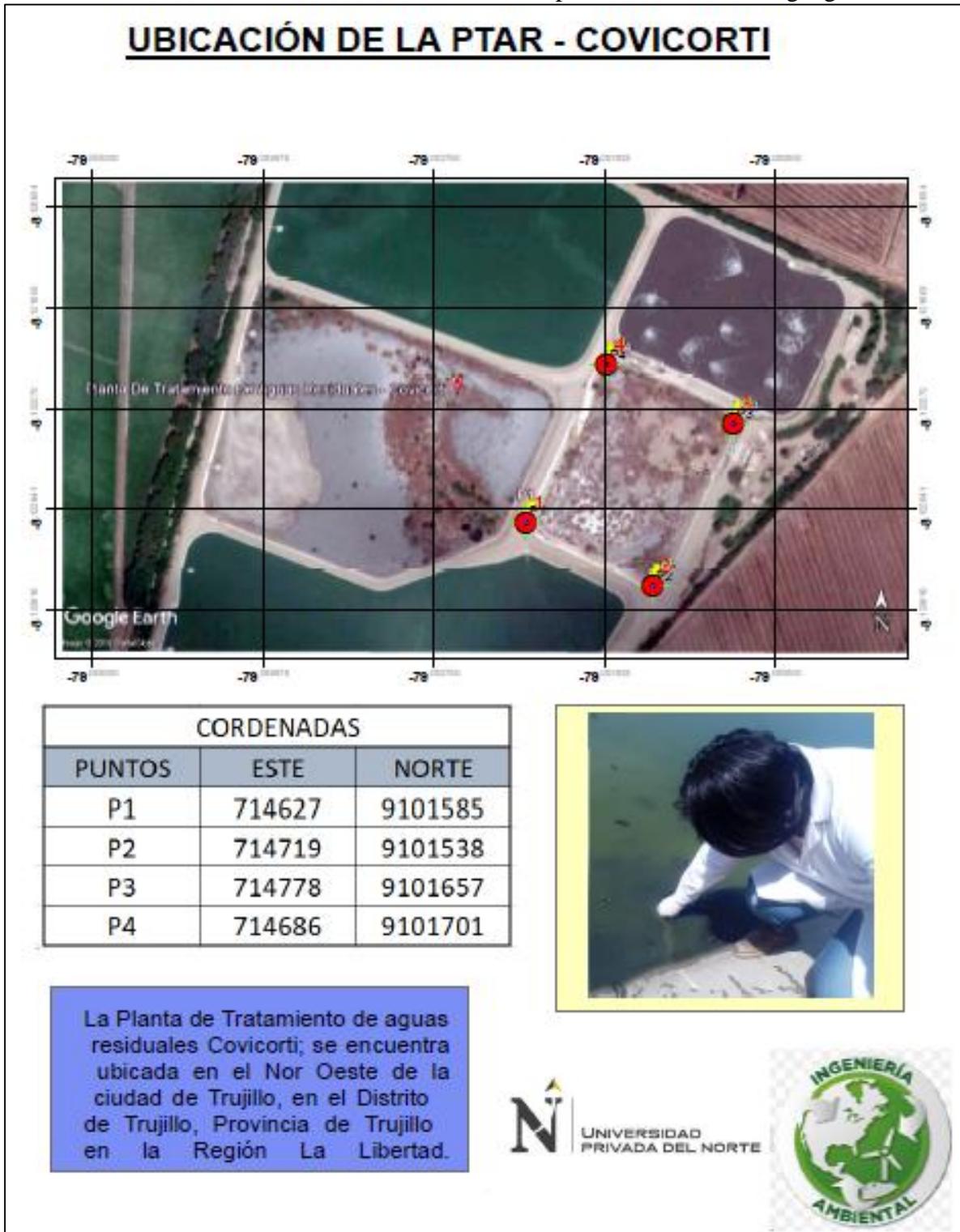
FIRMA RESPONSABLE



ANEXO n° 20: Ubicación del Establo San José a partir de coordenadas geográficas.



ANEXO n° 21: Ubicación de la PTAR – Covicorti a partir de coordenadas geográficas.



ANEXO n° 22: Matriz fotográfica

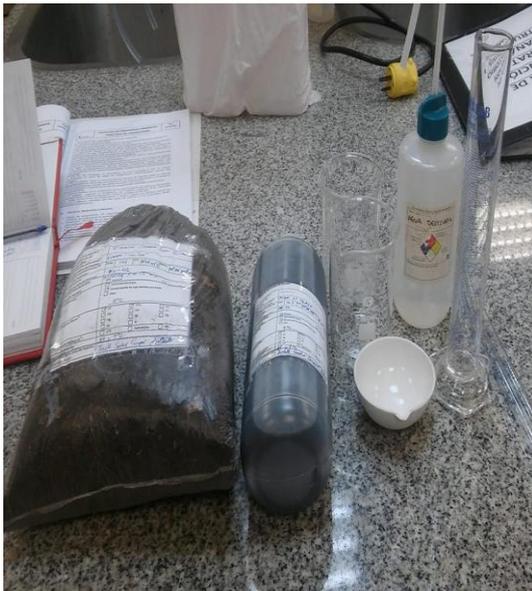
<p><b>Descripción:</b> Portada del establo San José para tomar muestras de estiércol de vacuno.</p>	<p><b>Descripción:</b> Acumulación de estiércol de vacuno en el establo San José.</p>
	
<p><b>Descripción:</b> Método de cuarteo para la selección de las muestras de estiércol de ganado vacuno.</p>	<p><b>Descripción:</b> Etiquetado de la muestra de estiércol de ganado vacuno.</p>
	
<p><b>Descripción:</b> Conservación de las muestras (estiércol de vacuno).</p>	<p><b>Descripción:</b> Llenado y firma de la cadena de custodia.</p>

	
<p><b>Descripción:</b> Toma de muestra de lodo de agua residual de la planta de tratamiento de Covicorti.</p>	<p><b>Descripción:</b> Pozas de la planta de tratamiento de aguas residuales de Covicorti.</p>
	
<p><b>Descripción:</b> Etiquetado, conservación y transportes de la muestra.</p>	



**Descripción:** Materiales de utilizados en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad Privada del Norte.

**Descripción:** Determinación de sólidos totales.



**Descripción:** Determinación del pH y temperatura de cada una de las muestras

**Descripción:** Determinación de sólidos volátiles y cenizas.



**Descripción:** Preparación del sustrato para el montaje experimental AME.



**Descripción:** Preparación de hidróxido de sodio a 2 molar.



**Descripción:** Elaboración del montaje experimental.



**Descripción:** Montaje experimental.



**Descripción:** Medición del volumen de agua desplazado por el gas.

