

# Caracterización del Funcionamiento de un Biodigestor Tubular Alimentado con Estiércol Porcino en la Amazonia Ecuatoriana

Characterization of the Operation of a Tubular Biodigester Fed with Pig Manure in the Ecuadorian Amazon

Caracterização do Funcionamento de um Biodigestor Tubular Alimentado com Estrume de Porco na Amazônia Equatoriana

6

**Pedro Andrés Peñafiel Arcos<sup>a</sup>**  
**Edwin Collahuaso<sup>b</sup>**  
**Amaury Pérez-Martínez<sup>c</sup>**  
**Karel Diéguez-Santana<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> Departamento Ciencias de la Vida, Programa Gestión y conservación ambiental, Universidad Estatal Amazónica, km 2 1/2 Vía Tena, Puyo, Pastaza, Ecuador.  
E-mail: ppenafiel@uea.edu.ec

<sup>b</sup> Departamento Ciencias de la Vida, Programa Gestión y conservación ambiental, Universidad Estatal Amazónica, km 2 1/2 Vía Tena, Puyo, Pastaza, Ecuador.  
E-mail: edwincollahuaso@gmail.com

<sup>c</sup> Departamento Ciencias de la Tierra, Programa Gestión y conservación ambiental, Universidad Estatal Amazónica, km 2 1/2 Vía Tena, Puyo, Pastaza, Ecuador.  
E-mail: amperez@uea.edu.ec

<sup>d</sup> Departamento Ciencias de la Vida, Programa Gestión y conservación ambiental, Universidad Estatal Amazónica, km 2 1/2 Vía Tena, Puyo, Pastaza, Ecuador.  
E-mail: kdieguez@uea.edu.ec

**Resumen**— Los desechos de estiércol animal son hoy en día generadores de una de las principales problemáticas ambientales. Estos son asociados con las emisiones de gases de efecto invernadero y elevados riesgos de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, al ser vertidos sin ningún o con un tratamiento parcial. Este trabajo tuvo como finalidad caracterizar el funcionamiento de un biodigestor tubular instalado en el Centro de Investigación y Posgrado para la Conservación Amazónica (CIPCA) de la Universidad Estatal Amazónica, que procesa un sustrato formado por excretas de cerdo y aguas residuales del lavado de corrales. Durante seis semanas se realizaron análisis de las características físicas, químicas y microbiológicas del influente y el efluente del biodigestor, en donde se obtuvieron porcentajes de remoción de sólidos totales y sólidos volátiles que llegaron a 91%, nitrógeno total Kjeldahl 97%, fósforo 77%, DQO 74%, DBO5 57% y coliformes totales con 5 unidades logarítmicas. Así mismo, fueron calculados los parámetros operacionales del equipo determinando que el tiempo de retención hidráulico (TRH) promedio del proceso es de 154 días, lo cual indica que actualmente el biodigestor trabaja con valores superiores al rango recomendado para condiciones mesofílicas (30-60 días), y por lo tanto está sobredimensionado para la carga diaria promedio de sustrato de 51.4 L. Esto genera que otros parámetros como la tasa de carga orgánica, producción específica de biogás y tasa de producción de biogás, presenten valores bajos para este tipo de procesos.

**Palabras clave**— biogás, digestión anaeróbica, producción porcina, tiempo de retención hidráulico.

**Abstract**— The animal manure waste are today generators of one of the main environmental problems. These are associated with greenhouse gas emissions and high risks of contamination of surface and groundwater, being discharged without any or partial treatment. The purpose of this work was to characterize the operation of a tubular biodigester installed in the Amazonian Research and Postgraduate Center for Conservation (CIPCA) of the Amazon State University, which processes a formed substrate by pig excreta and wastewater. For six weeks, the physical, chemical and microbiological characteristics of the influent and the biodigester effluent were analyzed, where percentages of removal of total solids and volatile solids reached 91%, total nitrogen Kjeldahl 97%, phosphorus 77%, COD 74%, BOD5 57% and total coliforms with 5 logarithmic units. Likewise, the operational parameters of the equipment were calculated determining that the average hydraulic retention time (TRH) of the process is 154 days, which indicates that currently the biodigester works with values above the recommended range for mesophilic conditions (30-60 days), and therefore it is oversized for the average daily substrate load of 51.4 L. This generates that other parameters such as the organic load rate, specific biogas production

**Keywords**— Biogas, anaerobic digestion, swine production, hydraulic retention time

**Resumo**— Os resíduos de estrume animal são hoje em dia um dos principais geradores de problemas ambientais. Estes estão associados às emissões de gases com efeito de estufa e aos elevados riscos de contaminação das águas superficiais e subterrâneas, quando são descarregados sem qualquer tratamento ou com tratamento parcial. O objectivo deste trabalho foi caracterizar o desempenho de um biodigestor tubular instalado no Centro de Investigação e Pós-Graduação para a Conservação da Amazónia (CIPCA) da Universidade Estadual Amazónica, que processa um substrato constituído por excrementos de porco e águas residuais de currais de lavagem. Durante seis semanas, foram realizadas análises das características físicas, químicas e microbiológicas do influente e efluente do biodigestor, obtendo-se percentagens de remoção de sólidos totais e sólidos voláteis que atingiram 91%, Kjeldahl total de azoto 97%, fósforo 77%, COD 74%, CBO5 57% e coliformes totais com 5 unidades logarítmicas. Do mesmo modo, os parâmetros operacionais do equipamento foram calculados, determinando que o tempo médio de retenção hidráulica (HRT) do processo é de 154 dias, o que indica que o biodigestor funciona actualmente com valores superiores à gama recomendada para condições mesófilas (30-60 dias), e por isso é sobredimensionado para a carga média diária do substrato de 51,4 L. Isto gera que outros parâmetros como o tempo de retenção hidráulica (HRT) do processo é de 154 dias. Isto faz com que outros parâmetros como a taxa de carga orgânica, a produção específica de biogás e a taxa de produção de biogás apresentem valores baixos para este tipo de processo.

**Palavras chave**— biogás, digestão anaeróbica, produção de suínos, tempo de retenção hidráulica.

## I. INTRODUCCION

La intensificación de la producción animal, entre ellas la porcina, genera en el desarrollo de sus actividades diversos problemas ambientales, como la generación de aguas residuales y sobreacumulación de materia orgánica en forma de excretas,[1][2]. Si bien estos desechos son una fuente valiosa de nutrientes para la producción de cultivos, sin prácticas adecuadas de tratamiento, son una gran fuente de contaminación [3]. lo que genera el deterioro de los suelos, la contaminación de aguas subterráneas y superficiales por escurrimiento cuando son dispersados [1]. Otro de los impactos ambientales generados, son los malos olores que, de ellas, y de los campos regados se desprenden, como producto de la descomposición de las excretas porcinas [4]. Por esta razón se hace necesario contar con un sistema de tratamiento factible de construir en zonas rurales que permita la remoción de contaminantes y a su vez cumplir con la legislación ambiental sobre vertimientos líquidos [5].

En Ecuador, durante esta actividad productiva, por lo general, los residuos líquidos y sólidos se vierten directamente a los afluentes o partes bajas de los establos, causando serios problemas de contaminación al aire, suelo y agua por la presencia de patógenos o exceso de nutrientes en las excretas[6],[7]. El estiércol contiene nutrientes (Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K)) que los cultivos pueden

asimilar [8], pero pueden poseer altas concentraciones de microorganismos patógenos (E. coli), que producen enfermedades infecciosas capaces de causar hasta la muerte en los humanos [1], lo cual según [9], hace que su uso directo como fertilizante no sea recomendado. Aunque, la legislación europea autoriza la utilización de los estiércoles como fertilizantes siempre que no se superen los 170 kg/hectárea/año [10].

Generalmente los residuos generados en las secciones porcinas tienen diversos métodos de tratamiento, (compost, lagunas de oxidación y la digestión anaerobia mediante biodigestores) [11], [3]., y la digestión anaerobia se destaca como la alternativa que permite la recuperación de nutrientes (fertilizante) y energía (metano) [12], logrando reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) [13]. Al usar un biodigestor, los nutrientes contenidos en las excretas se convierten en un bioabono líquido de uso directo en los cultivos, lo cual contribuye a la reducción del uso de los fertilizantes procesados químicamente, y por ende la contaminación ambiental que estos producen [14]. Aunque la presencia de elevados niveles de patógenos ha llevado a la modificación de los procesos tradicionales e incorporación de bioles de segunda y tercera generación. En el caso de los digestato de segunda generación incluye un proceso fermentativo homoláctico conducido por un consorcio microbiano.

Ese segundo digestato obtenido, se combina con un fertilizante mineral y se le denomina biol de tercera generación que aporta nutrientes para las plantas (tanto de origen orgánico y mineral) [15].

Los parámetros operacionales de un biodigestor tubular juegan un papel muy importante en el proceso de digestión anaerobia. Entre ellos destacan: ausencia de oxígeno, tipo y calidad del sustrato (biomasa), temperatura, TRH, pH, porcentaje de degradación e inhibidores de la degradación anaerobia [13]. Por otro lado, la producción de biogás es influenciada por el tipo de biomasa con la que se alimenta al biodigestor, en la cual se requiere que no solamente tenga fuentes de carbono y nitrógeno, sino también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores, [17]. Este equilibrio busca la producción de una mayor cantidad de biogás y una biomasa de alto contenido de nutrientes esenciales para el crecimiento de las bacterias [18].

En lo que respecta a la temperatura, existen tres rangos de operación en la digestión anaerobia: psicrófilico, mesófilico, y termófilico. La mayoría de biodigestores funcionan dentro de los límites mesofílicos y la digestión óptima se obtiene a 35°C [19]. Por su parte, el TRH, que es el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor, depende principalmente de la

temperatura ambiental y de la carga orgánica del digestor, los cuales determinan el volumen del digestor, pero a su vez también de la degradabilidad de la materia orgánica. En este sentido, a mayor degradabilidad menor TRH, y por lo tanto, menor sería el tiempo que tendría que pasar la materia orgánica dentro del reactor [20]. Además de la temperatura y el tiempo de retención, el pH es uno de los más importantes parámetros de control ya que las bacterias metanogénicas son muy sensibles a variaciones de este parámetro. Para promover la degradación y concentración de metano, el pH debe estar entre los 6,5 y 7,5, [21]. Si nos referimos al porcentaje de degradación, corresponde al porcentaje de la masa orgánica que se degrada durante el tiempo de retención y se transforma en biogás. Pero en la práctica, se requeriría tiempos de retención y volúmenes de digestor muy grandes para lograr una degradación casi total de la biomasa, es por eso que solo se logra degradar del 35 al 75% de la biomasa dependiendo principalmente de la temperatura, el TRH y el pH presente en el proceso [18].

El Centro de Investigación y Posgrado para la conservación Amazónica (CIPCA) de la Universidad Estatal Amazónica (UEA) se encuentra enclavado en medio de bosques tropicales primarios y secundarios,

colindando con dos ríos, Piatúa y Anzu. Dentro de la instalación, existe un programa porcino que tiene animales criollos con fines de investigación para la adaptación a las condiciones amazónicas. El año 2016, mediante la cooperación con la ONG Energía sin fronteras, se instaló un biodigestor para mitigar la contaminación y aprovechar los desperdicios de excretas y aguas residuales del lavado de los corrales, que anteriormente eran vertidos a esteros, que desembocaban en los ríos mencionados. También, con la finalidad de experimentar en tecnologías asociadas que sean apropiadas y sostenibles, a las condiciones rurales y sistemas productivos de la región Amazónica Ecuatoriana.

El biogás se aprovecha como fuente de combustible para producir energía calorífica, para diversos fines, mientras el digestato es empleado como fuente de nutrimento para cultivos de naranja, cacao, café y banano. Sin embargo, los parámetros de control del proceso y la composición fisicoquímica y microbiológica de las entradas y salidas no han sido caracterizadas. Por lo que, debido a la escasa información, el presente trabajo tiene como objetivo, caracterizar los diferentes indicadores fisicoquímicos operacionales del equipo, y su incidencia en el influente y efluente del biodigestor tubular instalado en el CIPCA.

## II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

El trabajo descrito fue realizado en el Centro de Investigación, Posgrado y Conservación de la Biodiversidad Amazónica (CIPCA) de la Universidad Estatal Amazónica (UEA), localizado en la Provincia de Napo, Cantón Carlos Julio Arosemena Tola. En el esquema

presentado en la figura 1, se visualiza la metodología desarrollada en este trabajo.

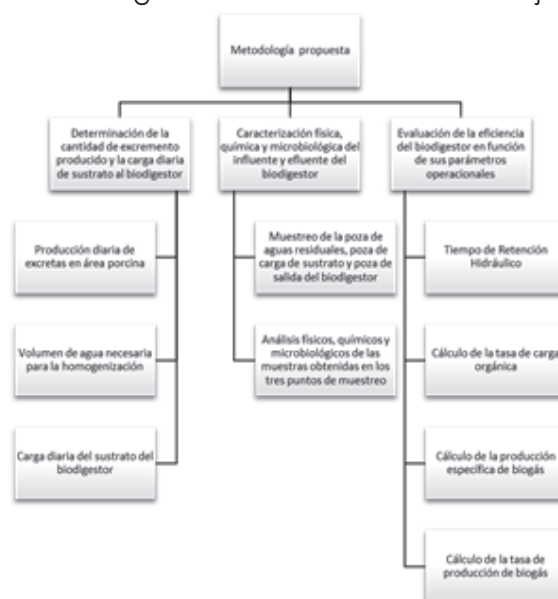


Figura 1. Esquema de la metodología realizada  
Fuente: Autor del proyecto

### A) Reactivos

En el experimento se utilizaron los siguientes compuestos químicos: ácido sulfúrico, agua destilada, ácido bórico, indicador Tashiro, hidróxido de sodio, ácido etilendiaminotetraacético, sal tetrasódica, tetrahidrato de sodio, cloruro de aluminio, agua desionizada, polvo reactivo PhosVer 3, ácido nítrico, polvo reactivo de potasio 1, dicromato de potasio 0.25 N, sulfato de mercurio, solución indicadora ferroína, sulfato ferroso amoniacal 0.25 N, soluciones de tampón de fosfato, sulfato de magnesio, cloruro de calcio, cloruro férrico, sulfito de sodio y ácido glucosa-glutámico, inhibidor de la nitrificación y agua peptonada. Todos los compuestos mencionados se utilizaron en grado analítico.

## B) Determinación de la cantidad de excremento producido y la carga diaria de sustrato al biodigestor

Producción diaria de excretas en área porcina: En el área de producción porcina, se cuenta con tres secciones: gestación, maternidad y precrianza y engorde. Se realizó el pesaje de los excrementos producidos diariamente en las tres secciones, lo cual depende de la alimentación proveída, que normalmente es a base de balanceado más suplementos de maní forrajero, dos veces al día y que suma 2 kg/d para machos sementales hembras en gestación y maternidad. Esta materia orgánica es utilizada como sustrato del biodigestor, al mezclarse y homogenizarse con agua. Este pesaje diario se realizó por seis semanas.

Volumen de agua necesaria para la homogenización: Se consideró la proporción de 4:1, esto quiere decir que por cada 10 kg de estiércol se aplicó 40 L de agua. El agua utilizada, es de carácter residual ya que se obtiene del lavado de corrales y pasillos de la propia área de producción porcina, disminuyendo de este modo el volumen de fluido que es vertido al cuerpo natural de agua receptor.

Carga diaria del sustrato del biodigestor: Para estimar la carga diaria se procedió a realizar el siguiente cálculo que se observa a continuación:

$$CD = EF * H_2O \quad (1)$$

Dónde: CD = carga diaria (kg)  
EF= estiércol fresco (kg), H<sub>2</sub>O = 4 L/kg

## C) Caracterización física, química y microbiológica del influente y efluente del biodigestor

Muestreo de la poza de aguas residuales, poza de carga de sustrato y poza de salida del biodigestor: Para realizar esta actividad, se establecieron tres puntos de muestreo: a) la poza de aguas residuales, que es en donde se recolectan las aguas residuales generadas del lavado de corrales y pasillos del área de producción porcina, b) poza de carga de sustrato, lugar donde homogeniza los excrementos recogidos del área con las aguas residuales mencionadas y que servirá de sustrato o influente del biodigestor, y c) poza de salida del biodigestor, donde se recoge el digestato o efluente del biodigestor. Las muestras recogidas de estos tres puntos, fueron llevadas al laboratorio de Ambiental de la Universidad Estatal Amazónica (UEA) para realizar los respectivos análisis.

## D) Análisis físico, químico y microbiológico de las muestras obtenidas en los tres puntos de muestreo

Determinación de Sólidos Totales (ST): los Sólidos Totales se determinaron según lo planteado en la sección 2540B por [22]. Se tomaron 100 mL de muestra, se homogenizaron y se depositaron en las capsulas para ser sometidas a 320 °C en el calentador hasta que se evaporó toda el agua, y tras la evaporización nuevamente se utilizó la estufa durante una hora y media más. Se enfrió las capsulas en el desecador y se procedieron a pesar rápidamente para evitar cambios en el peso por exposición al aire o degradación del residuo, y se registraron los datos.

Se repitió el calentamiento solo por 1 hora, hasta que la diferencia con el valor resultante previo fue inferior 0.5 mg con lo cual se consideró que se obtuvo un peso constante. El peso finalmente obtenido fue denominado Peso B.

**Determinación de Sólidos Volátiles (SVT):** los Sólidos Volátiles se determinaron según lo planteado en la sección 2540E por [22]. Se utilizó la cápsula con el residuo seco de la experimentación anterior (Peso B), y se procedió con el proceso de incineración a 550 °C durante 15 min. La muestra se puso en un desecador hasta que alcanzó la temperatura ambiente. Se pesó la capsula y se registró los datos. Se repitió las etapas hasta que la diferencia con el valor resultante previo sea <4% o <0,5 mg [22].

**Determinación de pH, Temperatura y Conductividad:** la medición de los parámetros descritos, se realizó *in situ* utilizando el multi-parámetro portátil PC60 Premium Multi-Parameter Tester (pH/EC/TDS/Salinity/Temp.) APERA INSTRUMENTS, LLC, calibrado y comprobado según lo planteado en la sección 4500-H<sup>+</sup> por [22].

**Determinación del Nitrógeno Total:** el Nitrógeno orgánico se determinó según lo planteado en la sección 4500-N<sub>org</sub>:1 por [22]. Se pesó 1g de muestra previamente molida en papel graso y se colocó en un tubo de digestión en forma de paquete con la finalidad que no se adhiera al equipo.

Luego, se adicionó la tableta Kjeldahl y 20 mL de ácido sulfúrico, se introdujeron los tubos en el digestor y se sometieron a una temperatura entre 370-400 °C por dos horas y posteriormente fueron enfriadas. Se agregó 35 mL de ácido Bórico al 2 % y 3 gotas de indicador Tashiro, y se colocó la mezcla en el aparato destilador. Luego se añadió 60 mL de hidróxido de sodio al 45.4% al tubo de digestión y esto se introdujo en el equipo destilador. Se procedió a destilar por 10 min hasta que se recogió aproximadamente de 100-150 mL. Se tituló con ácido sulfúrico 0.2 N hasta el cambio de color verde a púrpura, se anotó el consumo y realizaron los cálculos.

**Determinación del Nitrógeno Amoniacal:** el Nitrógeno amoniacal se determinó según lo planteado en la sección 4500-NH<sub>3</sub>-D por [22]. Se utilizó hidróxido de sodio 10 N, solución de NaOH / EDTA, 10 N, para lo cual se disolvió 400 g de NaOH en 800 mL de agua. Luego se añadió 45.2 g de ácido etilendiaminotetraacético, sal tetrasódica, tetrahidrato (Na<sub>4</sub>EDTA.4 H<sub>2</sub>O) y se procedió a agitar la mezcla para disolver. Luego, se enfrió y diluyó a 1000 mL. Para obtener la solución blanco de cloruro de amonio, se disolvió 3.819 g de NH<sub>4</sub>Cl anhidro (secado a 100 ° C) en agua, y se diluyó a 1000 mL; 1.00mL = 1.00 mg N = 1.22 mg NH<sub>3</sub>. Se calibró el electrodo y posteriormente se midió la muestra para determinar el nitrógeno amoniacal.

**Determinación del Fósforo:** el Fósforo se determinó según lo planteado en la sección 4500-P. por [22]. Para la determinación de este parámetro,



se utilizó un espectrofotómetro DR 2800, frascos volumétricos, una membrana de filtro de 0.45 mm, agua desionizada, una bolsa de polvo de reactivo PhosVer 3, para 10 mL, celda para muestra y un tapón neopreno número 3. Se procedió a llenar una celda con 10 mL de muestra, y se añadió el contenido de una bolsa de polvo de fósforo de PhosVer<sup>3</sup> cerrando la celda inmediatamente. Los resultados fueron obtenidos en el espectrofotómetro indicado.

Determinación del Potasio, Magnesio y Calcio: el Potasio, Magnesio y Calcio se determinaron en las secciones 3111B.3j4, 3111B.3j14 y 3111B.3j19 según lo planteado por [22]. Se recogieron las muestras en botellas de plástico lavadas y se ajustó el pH a 2 o menos con ácido nítrico. Se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica, Perkin Elmer Analyst 800, basados en técnica de Atomización por llama, frascos volumétricos y una membrana de filtro de 0.45mm, agua desionizada, bolsa de polvo de reactivo de potasio 1, solución estándar de potasio 100 mg/L, celda para muestra de 10 mL y Tapón de neopreno número 1. Posteriormente en el método de solución estándar se realizó una curva de calibración. La determinación de los valores de concentración de los parámetros, fueron realizados a partir del uso del programa respectivo del espectrofotómetro mencionado.

Determinación de DQO y DBO5: para la determinación de la demanda química de oxígeno y la demanda biológica de oxígeno, se envió las muestras de los tres

puntos al laboratorio LACQUANALISIS S.A, el cual presentó los resultados de los parámetros requeridos. Este laboratorio, y los análisis mencionados, están certificados por la autoridad ambiental correspondiente. Que utilizan los métodos descritos en las secciones 5220-D y 5210-B respectivamente propuesto por [22].

Determinación de Coliformes Totales y Escherichia Coli: los Coliformes Totales y Escherichia Coli se determinaron según lo planteado en la secciones 9221B y 9221F por [22]. Se utilizó agua peptonada y medio de cultivo criterion, dado que es un cultivo selectivo y diferencial adecuado para el crecimiento de las colonias coliformes. Las muestras estuvieron a temperatura ambiente. Se utilizó 13.25 g de cultivo criterion y 6 g de agua peptonada. Luego, se añadió 400 mL de agua destilada a la muestra de agua peptonada, y 500 mL de agua destilada al cultivo criterion, y toda esta solución se calentó hasta lograr una disolución completa. Las cajas petri, tubos y puntas durante fueron esterilizadas. Posteriormente se realizó la siembra, y las diluciones de la muestra fueron de 9 mL en cada tubo. Para la determinación de coliformes T. y E. coli se contó el crecimiento de cada colonia y se aplicó el siguiente cálculo:

$$U.F.C=(\#colonias \times dilución)/V_(muestra) \quad (2)$$

Donde:

UFC = unidad formadora de colonias, # Colonias = número de colonias por placa, Dilución = factor de dilución, V = volumen de la muestra sembrada (mL)

### E) Evaluación de la eficiencia del biodigestor en función de sus parámetros operacionales

Para la determinación de los parámetros operacionales del biodigestor, se empleó las ecuaciones descritas a continuación:

Tiempo de retención hidráulico (TRH): se refiere al período de tiempo que permanece el sustrato en el interior del biodigestor. La ecuación 3, muestra el cálculo de este parámetro.

$$TRH=V/Q \quad (3)$$

Donde, V, es el volumen del digestor ocupado por el sustrato (m<sup>3</sup>) y Q, es la carga diaria de entrada al biodigestor (m<sup>3</sup>/d)

Cálculo de la tasa de carga orgánica (TCO): este parámetro, según [25], se obtiene a partir de la ecuación 4.

$$TCO=(SV*Q)/V \quad (4)$$

Dónde: SV, son los sólidos volátiles en el sustrato del influente (kg/L), Q, es la carga diaria de entrada al biodigestor (L/d) y V, es el volumen del biodigestor ocupado por el sustrato (m<sup>3</sup>).

Producción específica de biogás (PEB): para la determinación se siguió la ecuación 5, basada en [26], [ 27] con el medidor de gases que está instalado en la parte exterior del biodigestor. Además, Q, es la carga diaria de entrada al biodigestor (L/d) y SV, es la concentración de sólidos volátiles (kg/L) contenido en el influente.

$$SBP=(V \text{ biogás producido})/(Q*SV \text{ añadidos}) \quad (5)$$

Tasa de producción de biogás (TPB): con los valores ya conocidos de volumen de biogás producido y volumen del biodigestor, se procedió a utilizar la ecuación 6 descrita en [26]

$$TPB=(V \text{ biogás (m}^3/\text{día)})/(V \text{ (m}^3)) \quad (6)$$

Donde, V biogás, es el volumen de biogás producido (m<sup>3</sup>/día) y V, es el volumen total del biodigestor (m<sup>3</sup>)

Medición del biogás generado: para el monitoreo del biogás, se estableció el uso y registro diario de gasómetros marca Humcar G 1.6 Gasmeter (m<sup>3</sup>), los mismos que estuvieron colocados en el área inicial y a la salida del biodigestor tubular analizado.

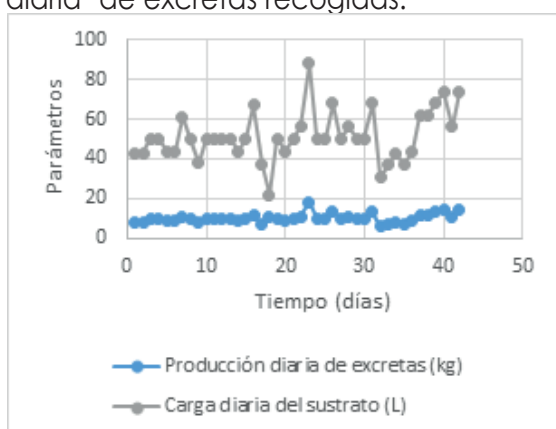
## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A) Determinación de la cantidad de excremento producido y la carga diaria de sustrato al biodigestor

Producción diaria de excretas en área porcina: la producción diaria de excretas se midió los 43 días que duró este estudio, en donde se obtuvo un valor promedio de 10.2 kg/día. El máximo valor de producción fue de 18 kg diarios, que se logró el día 23 de muestreo.

Carga diaria del sustrato del biodigestor: a partir de la cantidad de excretas producidas al día, se determinó la carga

diaria de sustrato que ingresa al biodigestor instalado, tomando en cuenta que este producto se homogenizó con agua siguiendo una proporción aproximada de 4:1. El valor promedio de carga diaria al equipo fue de 51.4 L, con un valor máximo de 88 L registrado el mismo día de máxima producción de excretas del área porcina. En la figura 2, se observa una comparación de este parámetro con la producción diaria de excretas recogidas.



**Figura 2.** Comparación entre la producción diaria de excretas y la carga diaria de sustrato del biodigestor.

Fuente: Autor del proyecto

Estos valores se consideran bajos con relación al volumen de líquido del biodigestor de 7.73 m<sup>3</sup> que corresponde al espacio ocupado del equipo sin tomar en cuenta la fracción de volumen para la acumulación del biogás. Para el volumen de líquido descrito, se debería tener una carga diaria de aproximadamente de 150 L [26].

## B) Caracterización física, química y microbiológica del influente y efluente del biodigestor

Los valores que se obtuvieron de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos de los tres

puntos de muestreo establecidos, poza de aguas residuales, poza de homogenización o carga y poza de salida o del efluente, se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Valores promedio de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las tres pozas analizadas

Parámetros	Tipo	Influente carga inicial		Efluente	Límites máximos permisibles <sup>a</sup>
		Poza de aguas residuales	Poza de carga	Poza de salida	
pH	Físicos	7.53 ± 0.1	7.39 ± 0.1	7.35 ± 0.04	6 a 9
Conductividad (ms/cm)		3.6 ± 0.1	3.4 ± 0.1	3.7 ± 0.1	
Sólidos totales (mg/L)		506 ± 56	28212 ± 223	2450 ± 121	1600
Cenizas totales (mg/L)		319 ± 24	22204 ± 213	1860 ± 108	
Sólidos volátiles totales (mg/L)	Químicos	187 ± 15	6008 ± 167	590 ± 76	
Fósforo (ppm)		53 ± 5.7	1275 ± 97	290 ± 21	10
Nitrógeno Kjeldahl (NKT) (ppm)		230 ± 18	15051 ± 340	373 ± 27	50
Nitrógeno amoniacal (ppm)		57.4 ± 5.7	287 ± 21	201 ± 17	30
Potasio (ppm)		0.00029 ± 1x10 <sup>-5</sup>	0.00132 ± 1x10 <sup>-4</sup>	0.000546 ± 1x10 <sup>-5</sup>	
Magnesio (ppm)		0.0012 ± 1x10 <sup>-4</sup>	0.00117 ± 1x10 <sup>-4</sup>	0.000224 ± 1x10 <sup>-5</sup>	2
Calcio (ppm)		0.0125 ± 1x10 <sup>-2</sup>	0.00576 ± 1x10 <sup>-4</sup>	0.00123 ± 1x10 <sup>-4</sup>	
DQO (mg/L)		2161 ± 270	7546 ± 310	1982 ± 117	200
DBO <sub>5</sub> (mg/L)		1114 ± 97	2488 ± 281	1082 ± 111	100
Coliformes T. (UFC/mL)	T. Microbiológicos	2.2x10 <sup>5</sup> ± 1x10 <sup>6</sup>	incantables	2.6x10 <sup>5</sup> ± 1x10 <sup>6</sup>	
E. Coli (UFC/mL)		1.12x10 <sup>6</sup> ± 1x10 <sup>7</sup>	incantables	8.2x10 <sup>5</sup> ± 1x10 <sup>6</sup>	

Fuente: Autor

<sup>a</sup> Límites máximos permisibles según el Acuerdo Ministerial 097-A(MAE, 2015).

Conductividad, pH y Temperatura: Los valores de pH y conductividad eléctrica se mantuvieron estables durante todo el muestreo, en las tres pozas. El valor de pH debe estar entre 6.6 y 7.6 para un adecuado funcionamiento del biodigestor [28]. En las pozas de aguas residuales y de carga este parámetro superó el rango mencionado, pero en la poza de salida se mantuvo dentro de los valores mencionados, al obtener datos entre 7.2 y 7.4, lo que indica un funcionamiento aceptable del equipo específico a este parámetro. En cuanto a la conductividad, el rango de valores obtenidos tanto en el

influyente como en el efluente, se mantuvo sin reducciones considerables, lo cual indica que los microorganismos no han consumido de manera efectiva los compuestos solubles del sustrato, pero presenta condiciones normales de operación [23].

La biodigestión en el equipo se da en condiciones mesofílicas, puesto que la temperatura se mantiene alrededor de 23 °C durante los tres meses de estudio, por lo que se encuentra en el rango de 20 °C a 45 °C [24].

Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles: en relación con estos parámetros, los valores más altos se encuentran en la poza de carga debido a que en esta sección, se realiza la homogenización de las excretas con las aguas residuales generadas en la limpieza del área de producción porcina, lo que contribuye notablemente a la concentración de sólidos. A su vez se puede observar en tabla 1, que hay un decrecimiento notable en los valores de concentraciones en la poza de salida, obteniendo resultados de reducción de entre el 90% y el 91% en estos dos parámetros.

Nitrógeno Total Kjeldahl y Nitrógeno Amoniacal: la poza de carga sigue siendo la sección donde se presentan los mayores valores de concentración, por lo expuesto anteriormente. En este caso, la reducción más notable en la poza de salida se manifiesta en el Nitrógeno Total

en donde obtiene un decrecimiento del 97% en el valor de concentración comparado a los valores del influente. De forma diferente se manifiesta los resultados del Nitrógeno Amoniacal, donde se obtuvo solamente una reducción del 30% debido a las condiciones anaerobias que limitan la nitrificación. Los valores determinados de este parámetro no presentan un inconveniente en el proceso, ya que para el rango de 200 – 1000 mg/L no provoca efectos adversos en el poder de degradación microbiano [17].

Fósforo, Potasio, Magnesio y Calcio: según los datos resultantes presentados en la tabla 1, del resto de nutrientes presentes, el Fósforo es el único que presenta valores de concentración importantes. En el proceso, se logra una disminución del 77% de este parámetro. En resumen, las tasas de remoción de minerales están relacionadas a los TRH de funcionamiento de los biodigestores. Cuando se extienden los tiempos de retención en los procesos de DA, los nutrientes se tienden a mineralizar y precipitan, por lo que pueden encontrarse en los lodos que se van depositando en el interior del biodigestor (se evacúan en los procesos de limpieza y mantenimiento periódicos). Estos resultados han sido reportados en estudios anteriores, por ejemplo, en la codigestión anaeróbica de estiércol de aves de corral y ensilaje de maíz han mostrado en la fase líquida condujo a eficiencias de remoción promedio de 72.1% y 95.1% de nitrógeno y fósforo, respectivamente [30]. Mientras que en ensayos por lotes con mezclas de aguas

de lavado y estiércoles porcinos se han mostrado remociones de N y P de 80% [32].

DQO y DBO<sub>5</sub>: los resultados de DQO y DBO<sub>5</sub>, de las tres pozas, mostrados en la tabla 1, presentan disminuciones entre las concentraciones del influente y el efluente, con una reducción del 74% para el DQO, y del 57% para el DBO<sub>5</sub>, aun así quedan cargas sin mineralizar que pueden ser problemas potenciales de contaminación de suelos y cuerpos de agua adyacentes al lugar, donde pueden incrementar el potencial de acidificación y eutrofización [31][33], por lo que se requiere añadir un sistema que continúe el tratamiento y que remueva principalmente Nitrógeno, Sólidos Totales, DBO<sub>5</sub> y DQO.

Coliformes Totales y Escherichia Coli: En lo referente a estos dos parámetros, entre las pozas de carga y salida, se produjo una disminución de por lo menos 5 unidades logarítmicas, lo cual representa una reducción considerable y está dentro del rango deseado de trabajo del biodigestor.

El digestato de salida, puede tener aportes nutricionales para la aplicación a los cultivos, pero las concentraciones son insuficientes para compararlo con un fertilizante orgánico, pues según Anexo 8, del Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícola [34] y la normativa europea, el mínimo para ser declarado para un subtipo fertilizante orgánico de cada nutriente N, P o K debe ser al menos 1% [35], y en ninguno de los mismos logra llegar a esa cantidad el digestato final obtenido.

### C) Evaluación de la eficiencia del biodigestor en función de sus parámetros operacionales

Tiempo de Retención Hidráulica: para evaluar el TRH se consideró la carga diaria en L/día y el volumen de líquido del biodigestor, que es de 7.33 m<sup>3</sup>. Esto permitió conocer el tiempo que permaneció la materia orgánica (estiércol) dentro del reactor. La figura 3, muestra el comportamiento diario del TRH durante el periodo de muestreo.

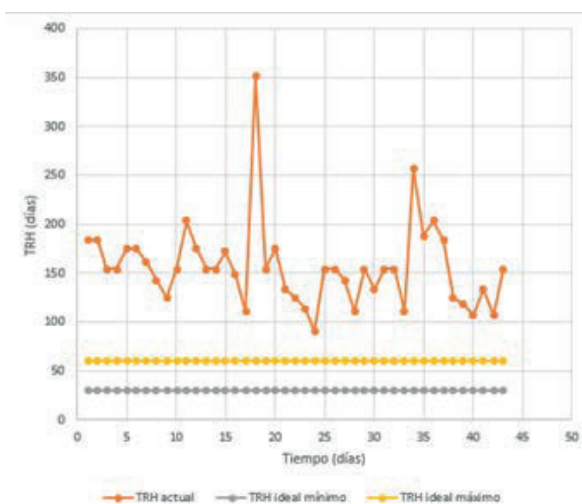


Figura 3. Comparación entre el TRH actual del equipo con el rango ideal en condiciones mesofílicas

Como se puede observar en la figura 3, el valor del TRH promedio actual en el equipo es de 154 días, que corresponde a una carga diaria promedio de 51.4 L. Los valores ideales de TRH para este tipo de procesos en condiciones mesofílicas están en un rango de 30 a 60 días [26], por lo cual los resultados obtenidos en todo el periodo de muestreo son superiores. Esto indica que el biodigestor está sobredimensionado para la carga diaria actual de sustrato de entrada.

Aunque altos valores de TRH permiten una mayor degradación del sustrato y por ende una mayor generación de biogás [37], hay que tomar en cuenta que la producción gaseosa empieza a disminuir una vez alcanzado un valor óptimo [17], característica que se podría estar presentando bajo las condiciones actuales. A su vez, tiempos de retención elevados pueden provocar la muerte de microorganismos debido a la escasez de nutrientes [28], lo cual reduce la eficiencia del equipo.

De manera positiva, el biodigestor analizado alcanza altas eficiencias de remoción de sólidos volátiles (SVT) y totales (ST), presentando valores de reducción superiores al 90% se observa en Tabla 1, y presenta una oportunidad de tratamiento a largo plazo considerando el crecimiento del proyecto porcino, y por ende la producción de excretas y aguas residuales. Estos valores son elevados y están asociados al TRH (154 días). En estudio realizado por [36] en biodigestores similares se reporta una reducción de sólidos totales y volátiles del 61%, pero en este caso el TRH fue de 81 días. Para reducir los TRH se podría incorporar la recolección de otros residuos generados dentro de la institución que se pueden combinar con los existentes para disminuir los tiempos de retención hidráulica y acercarse a los valores de carga obtenidos para un digestor de esas dimensiones.

Tasa de carga orgánica: según las dimensiones del biodigestor analizado, el volumen ocupado por el sustrato es de 7.73 m<sup>3</sup>. El

valor promedio determinado en el periodo de estudio del parámetro Sólidos Volátiles en el influente es de 6008 mg/L y el caudal promedio de ingreso diario al equipo es de 51.4 L. Con estos datos, se aplica la ecuación (4) y se concluye que la materia orgánica que se ha cargado diariamente por metro cúbico del biodigestor es 0.04 kg/m<sup>3</sup>/día a lo largo de las 6 semanas de estudio. Este resultado es bajo debido a la reducida producción de excretas del sector porcino de la locación, lo cual incide directamente en la carga diaria del equipo. En biodigestores similares se han alimentado mezclas de estiércoles de llama, oveja y vaca a razón de 0.44 kg SV/m<sup>3</sup>/día, aunque con TRH de 81 días [36]. De igual forma que las condiciones actuales de TRH, determinamos con este valor que el equipo está sobredimensionado para la carga orgánica diaria generada.

Producción específica de biogás: para la determinación de este parámetro, se tomó en cuenta la producción de gas medida diariamente a la salida del biodigestor, obteniendo un promedio igual a 0.487 m<sup>3</sup>. Con estos datos, se aplicó la ecuación (5) siendo el valor obtenido de 1.58 m<sup>3</sup>/kgSV/día, el cual se considera bajo y está directamente relacionado con la carga diaria del equipo.

Tasa de producción de biogás: para la obtención de este parámetro, tomamos en cuenta el volumen total del biodigestor que es 11.04 m<sup>3</sup>. Se aplicó la ecuación (6) y el valor

obtenido fue de 0.044 m<sup>3</sup> biogás producido/m<sup>3</sup> biodigestor, que es una tasa de producción de biogás baja, para este tipo de procesos, valores similares han sido obtenidos en biodigestores tubulares alimentados con mezclas de estiércoles de llama y oveja en condiciones reales de clima frío y tierras altas en el altiplano de Bolivia (0.05 m<sup>3</sup> biogás /m<sup>3</sup> biodigestor), sin embargo, los estiércoles de vaca y oveja en las mismas condiciones alcanzó un rendimiento de biogás hasta 0.15 m<sup>3</sup> biogás /m<sup>3</sup> biodigestor [36]. Valores inferiores se encontraron en digestores tubulares sin calefacción de bajo costo implementados a gran altura en los Andes peruanos (2800 m.s.n.m) con estiércol de vaca (0.03 m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup> de biodigestor [38]). El gas es empleado y se aprovecha la fracción energética de los residuos. El uso de la energía proveniente del biogás es un factor bien importante en el medio rural, pues aunque en Ecuador, la producción de energía está basada en energía hidroeléctrica, y el país cuenta con combustibles fósiles, la fracción de energía renovable es bien discreta, menor del 3% [29] y la producción de energía renovable a partir de desechos, se debe considerar como la más deseada en términos ambientales.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró monitorear el funcionamiento de un biodigestor tubular, que procesa un sustrato formado por excretas de cerdo y aguas residuales producto del lavado de corrales, basada en la determinación de los parámetros operacionales del equipo y el porcentaje de remoción de características físicas, químicas y microbiológicas. Se determinó

que el equipo actualmente está sobredimensionado para la carga diaria de sustrato, debido a que los valores de TRH (154 días) son superiores al rango de 30 a 60 días que se recomiendan en condiciones mesofílicas. Esta condición afecta directamente a la tasa de carga orgánica, producción específica de biogás y tasa de producción de biogás, las cuales presentan valores bajos para este tipo de actividades. Como alternativa se podría utilizar la recolección de otros residuos generados en el Centro de Investigación, Posgrado y Conservación Amazónica, que se podrían combinar con los existentes para disminuir los tiempos de retención hidráulica y acercarse a los valores de carga obtenidos para un digestor de esas dimensiones.

En cuanto a la eficacia de remoción de contaminantes, se obtuvieron reducciones importantes en la concentración de sólidos totales y sólidos volátiles que llegaron a 91%, nitrógeno total Kjeldahl 97%, fósforo 77%, DQO 74%, DBO5 57% y Coliformes totales con 5 unidades logarítmicas. Aun cuando estos resultados demostraron una adecuada actividad microbiológica en el biodigestor, esta remoción no es suficiente para cumplir con la normativa vigente sobre descargas en cuerpos naturales de agua, lo que genera la necesidad de un proceso complementario para su tratamiento.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Organización Catalana "Ingeniería Sin Fronteras" y al proyecto "Fortalecimiento de la cooperación universitaria/municipal en la implementación de tecnologías

apropiadas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos orgánicos" financiados por la AECID Ecuador. Además, a la Ing. Janeth Sánchez, el Ing. Facundo García y PhD Jaime Martí por la colaboración en el proyecto de investigación.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Hu, Y., Cheng, H., & Tao, S. (2017). Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation. *Environment international*, 107, 111-130. doi:10.1016/j.envint.2017.07.003
- [2] Stoddard, E. A., & Hovorka, A. (2019). Animals, vulnerability and global environmental change: The case of farmed pigs in concentrated animal feeding operations in North Carolina. *Geoforum*, 100, 153-165. doi:10.1016/j.geoforum.2019.01.002
- [3] Takahashi, Y., Nomura, H., Son, C. T., Kusudo, T., & Yabe, M. (2020). Manure management and pollution levels of contract and non-contract livestock farming in Vietnam. *Science of the Total Environment*, 710, 136200.
- [4] Hadlocon, L., Zhao, L., Bohrer, G., Kenny, W., Garrity, S., Wang, J., . . . Upadhyay, J. (2015). Modeling of particulate matter dispersion from a poultry facility using AERMOD. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(2), 206-217. doi:10.1080/10962247.2014.986306.
- [5] Hu, Y., Cheng, H., & Tao, S. (2017). Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation. *Environment international*, 107, 111-130. doi:10.1016/j.envint.2017.07.003
- [6] Stoddard, E. A., & Hovorka, A. (2019). Animals, vulnerability and global environmental change: The case of farmed pigs in concentrated animal feeding operations in North Carolina. *Geoforum*, 100, 153-165. doi:10.1016/j.geoforum.2019.01.002
- [7] Takahashi, Y., Nomura, H., Son, C. T., Kusudo, T., & Yabe, M. (2020). Manure management and pollution levels of contract and non-contract livestock farming in Vietnam. *Science of the Total Environment*, 710, 136200.
- [8] Hadlocon, L., Zhao, L., Bohrer, G., Kenny, W., Garrity, S., Wang, J., . . . Upadhyay, J. (2015). Modeling of particulate matter dispersion from a poultry facility using AERMOD. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(2), 206-217. doi:10.1080/10962247.2014.986306.
- [9] Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C., & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370
- [10] Commission, E. (2011). Report from the commission to the Council and the European Parliament on implementation of the Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of water against pollution caused by nitrates from agricultural sources for the period 2004-2007 SEC(2010)118, COM(2007)47 final/2. Retrieved from Brussels: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52010DC0047R%2801%29>



- [11] Cárdenas, E. V., Maldonado, J. M., Valdez, R. A., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2019). La producción más limpia en el sector porcino. Una experiencia desde la Amazonia Ecuatoriana. *Anales Científicos*, 80(1), 76-91. doi:http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i1.1288
- [12] Hien, P. T. T., Preston, T., Lam, V., & Khang, D. N. (2014). Vegetable waste supplemented with human or animal excreta as substrate for biogas production. *Livestock Research for Rural Development*, 26(10).
- [13] Duan, N., Khoshnevisan, B., Lin, C., Liu, Z., & Liu, H. (2020). Life cycle assessment of anaerobic digestion of pig manure coupled with different digestate treatment technologies. *Environment international*, 137, 105522. doi:10.1016/j.envint.2020.105522
- [14] Ramón, A., Romero, F., & Simanca, J. (2013). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental agua, aire y suelo*, 1(1), 15-23.
- [15] Zanabria, J. I. (2019). Evaluación de la calidad de biol de segunda y tercera generación de estiércol de cuy producido en un biodigestor instalado en el instituto regional de la costa de la UNALM. (Opción al Título Profesional de Ingeniero Ambiental ), Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú
- [16] Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development*, 14(1), 2002.
- [17] Varnero Moreno, M. T. (2011). Manual de biogas. Santiago de Chile, Chile: MINENERGIA/PNUD/FAO/GEF.
- [18] Moncayo Romero, G. (2008). Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás: Aqualimpia Beratende Ingenieure.
- [19] Duan, N., Zhang, D., Lin, C., Zhang, Y., Zhao, L., Liu, H., & Liu, Z. (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of environmental management*, 231, 646-652. doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.062
- [20] Salminen, E. A., & Rintala, J. A. (2002). Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. *Water Research*, 36(13), 3175-3182. doi:10.1016/S0043-1354(02)00010-6
- [21] Liu, C.-f., Yuan, X.-z., Zeng, G.-m., Li, W.-w., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 99(4), 882-888. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.013

- [22] Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Edition. USA: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation.
- [23] Lansing, S., Botero, R. B., & Martin, J. F. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology*, 99(13), 5881-5890. doi:10.1016/j.biortech.2007.09.090
- [24] Morgan Jr, H. M., Xie, W., Liang, J., Mao, H., Lei, H., Ruan, R., & Bu, Q. (2018). A techno-economic evaluation of anaerobic biogas producing systems in developing countries. *Bioresource Technology*, 250, 910-921. doi:10.1016/j.biortech.2017.12.013
- [25] Khan, M. A., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Nghiem, L. D., Hai, F. I., . . . Wu, Y. (2016). Optimization of process parameters for production of volatile fatty acid, biohydrogen and methane from anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 219(Supplement C), 738-748. doi:10.1016/j.biortech.2016.08.073
- [26] Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614. doi:10.1016/j.rser.2016.01.071X., & Preston, T. (1999). Gas production from pig manure fed at different loading rates to polyethylene tubular biodigesters. *Livestock Research for Rural Development*, 11(1).
- [27] Martínez Hernández, C. M., & García López, Y. (2016). Use of basic and specific pre-treatments for the biogas production. Revision and analysis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 81-92.
- [28] Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322. doi:10.1016/j.rser.2017.05.137
- [29] Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., & Santana, K. D. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad*, 73(573), 60-68.
- [30] Yilmazel, Y. D., & Demirer, G. N. (2013). Nitrogen and phosphorus recovery from anaerobic co-digestion residues of poultry manure and maize silage via struvite precipitation. *Waste Management & Research*, 31(8), 792-804. doi:10.1177/0734242X13492005
- [31] Diéguez-Santana, K., Casas-Ledón, Y., Loureiro Salabarría, J. A., Pérez-Martínez, A., & Arteaga-Pérez, L. E. (2020). A life cycle assessment of bread production: A Cuban case study. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 8(2), 125-137. doi:https://doi.org/10.5890/JEAM.2020.06.002
- [32] Taddeo, R., & Lepistö, R. (2015). Struvite precipitation in raw and co-digested swine slurries for nutrients recovery in batch reactors. *Water Science and Technology*, 71(6), 892-897. doi:10.2166/wst.2015.045 %J Water Science and Technology

- [33] Soto-Cabrera, A. I., Panimboza-Ojeda, A. P., Ilibay-Granda, C. G., Valverde-Lara, C. R., & Diéguez-Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, 18(1). doi:<https://doi.org/10.15665/rp.v18i1>.
- [34] MAG. (2018). Manual técnico para el registro y control de fertilizantes, enmiendas de suelo y productos afines de uso agrícolas Retrieved from Quito, Ecuador: <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/Manual-T%C3%A9cnico-para-registro-y-control-fertilizantes-enmiendas-de-suelo-y-productos-afines-de-uso-agr%C3%ADcola-14-12-2018-publicar-web.pdf>
- [35] Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo, 25.6.2019 C.F.R. (2019).
- [36] Martí-Herrero, J., Alvarez, R., Cespedes, R., Rojas, M. R., Conde, V., Aliaga, L., . . . Danov, S. (2015). Cow, sheep and llama manure at psychrophilic anaerobic co-digestion with low cost tubular digesters in cold climate and high altitude. *Bioresource Technology*, 181, 238-246. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.063>
- [37] Wijesinghe, D. T. N. (2017). Enhancement of methane generation by reducing nitrogen concentration during anaerobic digestion of swine manure. (Doctor of Philosophy), The University of Melbourne, Melbourne, Australia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11343/197463>
- [38] Garfí, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude. *Ecological Engineering*, 37(12), 2066-2070. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- [39] Hadlocon, L., Zhao, L., Bohrer, G., Kenny, W., Garrity, S., Wang, J., . . . Upadhyay, J. (2015). Modeling of particulate matter dispersion from a poultry facility using AERMOD. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65(2), 206-217. doi:10.1080/10962247.2014.986306
- [40] MAE. (2015). Acuerdo Ministerial 097-A. Reforma Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI. Quito, Ecuador Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>
- [41] Pu, Q., Zhao, L.-X., Li, Y.-T., & Su, J.-Q. (2020). Manure fertilization increase antibiotic resistance in soils from typical greenhouse vegetable production bases, China. *Journal of Hazardous Materials*, 391, 122267. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122267
- [42] Torrella, S. B. (2008). Para una correcta selección y explotación de digestores anaerobios. *Revista de producción animal*, 20(2), 102-110.
- [43] Van Doren, L. G., Posmanik, R., Bicalho, F. A., Tester, J. W., & Sills, D. L. (2017). Prospects for energy recovery during hydrothermal and biological processing of waste biomass. *Bioresource Technology*, 225, 67-74. doi:10.1016/j.biortech.2016.11.030