

## Implementación de biodigestores tubulares anaeróbico, como herramienta de auto sustentabilidad para la producción de biogás y biol en el cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador

Implementation of anaerobic tubular biodigesters, as a self-sustainability tool for the production of biogas and biol in the Guaranda canton, Bolívar province, Ecuador

Luis Verdezoto del Salto <sup>1</sup>[0000-0002-8068-331X], Franz Verdezoto Mendoza <sup>1</sup>[0000-0002-1661-7537], Adrián Navas Rea <sup>1</sup>[0000-0003-2297-6752], Enma Rodríguez Cepeda <sup>1</sup>[0000-0001-6419-4754]

<sup>1</sup>Universidad Estatal de Bolívar. Campus Académico “Alpachaca” Av. Ernesto Che Guevara s/n y Av. Gabriel Secaira, Guaranda, Ecuador.

<sup>1</sup>{lverdezoto, fverdezoto, anavas}@ueb.edu.ec, enmy\_rodriguez@hotmail.com

### CITA EN APA:

Verdezoto del Salto, L., Verdezoto Mendoza, F., Navas Rea, A., & Rodríguez Cepeda, E. (2022). Implementación de biodigestores tubulares anaeróbico, como herramienta de auto sustentabilidad para la producción de biogás y biol en el cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador. *Tesla Revista Científica*, 3(1), e98.

<https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e98>

**Recibido:** 30 de septiembre 2022

**Revisado:** 05 oct al 01 nov 2022

**Corregido:** 12 de noviembre 2022

**Aceptado:** 16 de noviembre 2022

**Publicado:** 01 de enero 2023

### TESLA

Revista Científica

ISSN: 2796-9320



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

**Resumen.** El diseño propuesto en base a la cantidad de residuo disponible generó el tratamiento de 12.5 Kg estiércol/día, ganado vacuno, presenta una humedad de 86.05 %, una relación C/N de 20.3 que se encuentran dentro de los parámetros ideales para la biodigestión anaeróbica, para utilizar la materia prima en un biodigestor tubular, se requirió diluir al 10 % con un volumen de agua de 0.46 m<sup>3</sup>/día, el volumen total del biodigestor para tratar la materia prima en las condiciones climáticas del lugar de instalación es de 35.4 [ m ] ^3, volumen que se reparte en tres biodigestores de 17.68 m<sup>3</sup> con lo cual las dimensiones del biodigestor tiene un ancho de rollo de 2 metros y longitud de 9.3 metros, construido con material de bajo costo y demuestra ser manejable. Se ha producido biogás de una calidad mínima del 58 % y máxima del 70.07 % de CH<sub>4</sub>, con trazas de H<sub>2</sub>S que no sobrepasan los 40 ppm. Los nutrientes presentes en el biol, nitrógeno mineral en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, sobrepasa los 43 ppm, fósforo sobre los 14 ppm y potasio sobre los 100 ppm.

**Palabras clave:** biogás, biol, nutrientes, biodigestor, anaeróbico.

**Abstract:** The proposed design based on the amount of available waste generated the treatment of 12.5 Kg manure/day, which has a humidity of 86.05%, a C/N ratio of 20.3, which are within the ideal parameters for the anaerobic biodigestion, to use the raw material in a tubular biodigester, it was required to dilute the total volume of the biodigester to 10% with a volume of water of 0.46 m<sup>3</sup>/day to treat the raw material in the climatic conditions of the installation site is 35.4 m<sup>3</sup>, a volume that is divided into three biodigesters of 17.68 m<sup>3</sup>, with which the dimensions of the biodigester have a roll width of 2 meters and a length of 9.3 meters, built with low-cost material and demonstrates be manageable. Biogas has been produced with a minimum quality of 58% and a maximum of 70.07% CH<sub>4</sub>, with traces of H<sub>2</sub>S that do not exceed 40 ppm. The nutrients present in the biol, mineral nitrogen in the form of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, exceeds 43 ppm, phosphorus over 14 ppm and potassium over 100 ppm.

**Keywords:** biogas, biol, nutrients, biodigester, anaerobic.

## INTRODUCCIÓN

La producción de biogás por digestión anaeróbica de desechos orgánicos es importante para la transición a combustibles libres de fósiles (Nordell et al., 2022), así también es importante para el pequeño y mediano productor agropecuario que requiere fortalecer su sistema productivo para hacerlo resiliente ante los efectos del cambio climático, reducir su dependencia de insumos externos a la finca, dar el valor que corresponde a sus productos y acceder a los mercados (Martí, 2019).

Al capturar el metano en el biodigestor anaeróbico y quemarlo, este proceso evita las fugas de metano del estiércol a la atmósfera y, por lo tanto, reduce la liberación de este gas de efecto invernadero. El metano es de combustión limpia y, siempre que el hogar tenga acceso al estiércol, el combustible para esta tecnología es básicamente gratuito. El lodo que queda en el digestor después del proceso de digestión se puede usar como fertilizante en la agricultura, reemplazando los fertilizantes comprados comercialmente y brindando un mejor rendimiento que el uso de estiércol (sin fermentar) (Talevi et al., 2022).

El cantón Guaranda, al dejar su rol estratégico de conectividad entre la costa y la sierra, actualmente se podría definir “de base económica agropecuaria”, ya que el 57.6% del suelo, se destina a este sector económico, además su población mayoritariamente (74%) viven en el sector rural y se dedican a este tipo de actividades; además el cantón por su posición geográfica estratégica (cuenca alta del río Guayas), posee un valor ecológico funcional de los ecosistemas productores y reservas de agua (páramo, bosques naturales, protectores, constituidos por el 38,1% del usos de suelo), de importancia para el cantón, provincia y región (GADCG, 2014)

Los biodigestores anaeróbicos de bajo costo, son una herramienta que puede fortalecer la resiliencia de los pequeños y medianos productores agropecuarios, el cual tiene como principio fundamental utilizar la materia orgánica de los residuos animales y de cosechas y a partir de esto obtener productos con valor agregado como el biogás con un alto contenido de metano CH<sub>4</sub>. Los biodigestores reducen considerablemente (hasta en un 80%) los impactos ambientales potenciales asociados con el manejo del estiércol, el uso de combustibles y fertilizantes en las fincas de pequeña escala (Garfí et al., 2019)

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. En la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas

de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema (FAO et al., 2011)

El biogás es el nombre que recibe la mezcla de gases producida en la digestión anaerobia, y se caracteriza por tener, en general, un 50 % -70 % de metano (CH<sub>4</sub>), 40-20 % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y trazas de otros gases, entre los que cabe destacar el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). Lo interesante es el metano producido, que es combustible. De esta forma, los residuos orgánicos tienen el potencial de producir un gas combustible como es el biogás. Del otro lado está el fertilizante producido durante el proceso de digestión anaerobia dentro de los biodigestores llamado biol, efluente o digestato. En el proceso de digestión anaerobia, los nutrientes (Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K) y otros contenidos en los residuos orgánicos que entran en forma orgánica, se mineralizan, pasan a ser disponibles para la planta (Martí, 2019)

La provincia Bolívar, ubicada en el centro del Ecuador es eminentemente agropecuaria, resultado de ello, tiene como subproducto la biomasa que puede ser aprovechada en la biodigestión anaeróbica. La Universidad Estatal de Bolívar consciente de ello implementa biodigestores anaeróbicos y aprovecha las condiciones climáticas de la temperatura media anual 13,9 °C, y la precipitación media anual de 837,4 mm con una altura promedio de 2600 msnm. (Verdezoto et al., 2021).

## METODOLOGÍA

### 2.1. Cuantificación de la materia prima

Se determinó la cantidad de la materia prima existente en base a las estimaciones realizadas por (Martí, 2019), las siguientes tablas presentan los valores para la estimación de la materia prima disponible.

**Tabla 1.** Kg de estiércol producido al día

| <i>Animal</i>        | <i>Kg de estiércol diario por cada 100 Kg de peso vivo</i> |
|----------------------|--|
| <i>Bobino</i>        | 8  |
| <i>Porcino</i>       | 4  |
| <i>Cabra / Oveja</i> | 4  |
| <i>Conejo</i>        | 3  |
| <i>Equino</i>        | 7  |

Fuente: (Martí, 2019)

**Tabla 2.** Materia prima disponible

| <i>Caso</i>                           | <i>Disponible</i>  |
|---------------------------------------|--|
| <i>Estabulados</i>                    | = materia prima estimada según la tabla 1  |
| <i>Estabulados solo a la noche</i>    | = 0.25 * la materia prima estimada   |
| <i>Estabulados un número de horas</i> | = $\left(\frac{\text{número de horas estabuladas}}{24 \text{ horas}}\right) * \text{materia prima estimada}$ |

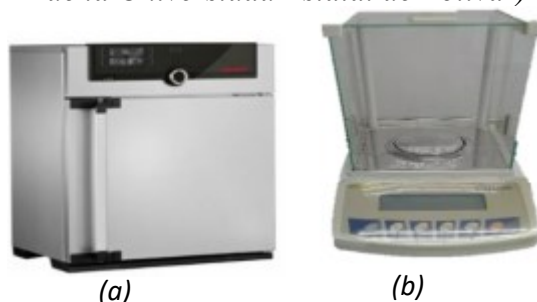
Fuente: (Martí, 2019)

## 2.2. Determinación del porcentaje de humedad (%H)

Para determinar el peso seco de la muestra se utilizó una estufa Nplus / sfplus-memmert y una balanza analítica DHAUS (0.001 g). Se trabajó con la norma (UNE -EN ISO 18134-3, 2016), esterilizando los crisoles durante un periodo de 60 minutos, luego se pesan 1 gramo de la muestra (peso fresco) y se deja en la estufa por un lapso cuatro horas a una temperatura constante de  $105 \pm 2$  °C, transcurrido ese tiempo se pesa (peso seco) y el porcentaje de humedad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% H = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Peso de la muestra fresca}} * 100 \quad \text{Ec. 1}$$

**Figura 1.** (a) Estufa Nplus/sfplus-memmert; (b) Balanza analítica DHAUS (0.001g) (Laboratorio de la Universidad Estatal de Bolívar)



## 2.3 Estimación de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) de la muestra.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de células nuevas. Se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1 (FAO et al., 2011). Con la siguiente ecuación se obtiene la relación C/N de la materia prima:

$$\frac{C}{N} = \frac{\text{Peso seco} * \% C}{\text{Peso seco} * \% N} \quad \text{Ec. 2}$$

El porcentaje de carbono y nitrógeno lo obtenemos de la (FAO et al., 2011). Para la materia prima de ganado bobino se resume en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Rango de niveles de nutrientes del estiércol de bovino.

| Materia Prima            | % C  | % N |
|--------------------------|------|-----|
| <b>Excreta de Bobino</b> | 40.6 | 2.0 |

Fuente: (FAO et al., 2011)

## 2.4. Estimación de la cantidad de agua

En los biodigestores tubulares se necesita diluir el estiércol de forma que no se formen ‘natas’ en la superficie. Una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor funcione como de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida en su interior, la dilución recomendada según Martí, (2019) es del 6 al 10 % de sólidos totales, por lo cual se estima la cantidad de agua necesaria con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ dilución requerida} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso seco} + W} \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

Difusión requerida = (6 al 10) %

W = cantidad de agua requerida

### 2.5. Estimación de la carga diaria del biodigestor (CD)

La carga diaria es la cantidad de estiércol y agua mezclados que entrarán al biodigestor cada día. Para los cálculos se hace una equivalencia entre 1 kg de estiércol y 1 litro de estiércol, asumiendo que el estiércol de ganado bobino tiene densidad de 1 kg/l (Martí, 2019).

### 2.6. Estimación del Volumen líquido del biodigestor

Se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$V_L = \text{Volumen de la carga diaria} * \text{Tiempo de retención} \quad \text{Ec. 4}$$

El tiempo de retención depende de la temperatura donde se ubica el biodigestor, las bacterias trabajan más rápido cuanto mayor es la temperatura. De este modo la temperatura de trabajo del biodigestor define el Tiempo de Retención (TR), que se puede asimilar como el tiempo que tarda la carga diaria en cruzar completamente el biodigestor, hasta que es evacuado por salida (Martí, 2019).

La siguiente tabla, la (FAO et al., 2011) propone tiempos de retención según el sitio geográfico donde se ubicará el biodigestor.

**Tabla 4.** Tiempo de retención según la temperatura

| Región Característica | Temperatura °C | Tiempo de retención (días) |
|-----------------------|----------------|----------------------------|
| Trópico               | 30             | 25                         |
| Valle                 | 20             | 37                         |
| Altiplano             | 10             | 75                         |

Fuente: (FAO et al., 2011)

### 2.7. Estimación del Volumen total del biodigestor

$$V_T = V_L + V_B \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$V_T$  = Volumen total del biodigestor

$V_L$  = Volumen líquido del biodigestor

$V_B$  = Volumen del biogás en el biodigestor

Martí, (2019), propone una proporción de volumen del biogás (20%) y volumen líquido (80%) de un biodigestor, entonces:

$$V_T = V_L + \frac{V_L}{4} \quad \text{Ec. 6}$$

### 2.8. Diseño del biodigestor tubular

El diseño de un biodigestor está definido por la relación óptima de la longitud (L) y el diámetro (D). Esta relación puede estar en un rango de 5 a 10 con un óptimo de 7.5 (Martí, 2019).

El diseño tubular corresponde a un cilindro, por lo tanto, se hace uso del ancho de rollo, el cual es la mitad del perímetro de la circunferencia total y este determina el diámetro y radio del biodigestor como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Estándares de medidas para biodigestores tubulares a partir del ancho de rollo.

| Ancho de rollo (m) | Perímetro de la circunferencia (m) | Radio (m) | Diámetro (m) |
|--------------------|------------------------------------|-----------|--------------|
| 1                  | 2                                  | 0.32      | 0.64         |
| 1.25               | 2.5                                | 0.4       | 0.8          |
| 1.5                | 3                                  | 0.48      | 0.96         |
| 1.75               | 3.5                                | 0.56      | 1.12         |
| 2                  | 4                                  | 0.64      | 1.28         |

Fuente: (Martí, 2019) (adaptada)

Si el volumen del cilindro equivale al volumen total entonces:

$$V_T = 2\pi r^2 L \quad \text{Ec. 7}$$

Entonces la longitud se define de la siguiente manera:

$$L = \frac{V_T}{2\pi r^2} \quad \text{Ec. 8}$$

A partir de los valores de la Tabla 5, la ecuación 8, el volumen total y el valor constante de  $\pi$  podemos determinar el diseño adecuado del biodigestor tubular como se presenta en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros para la obtención de las medidas óptimas del biodigestor

| Ancho de rollo (m) | Longitud del biodigestor (L) (m) | Diámetro (D) (m) | L/D (5-7) |
|--------------------|----------------------------------|------------------|-----------|
| 1                  | $\frac{V_T}{0.32}$               | 0.64             | L/D       |
| 1.25               | $\frac{V_T}{0.5}$                | 0.8              | L/D       |
| 1.5                | $\frac{V_T}{0.72}$               | 0.96             | L/D       |
| 1.75               | $\frac{V_T}{0.97}$               | 1.12             | L/D       |
| 2                  | $\frac{V_T}{1.27}$               | 1.28             | L/D       |

Fuente: (Martí, 2019) (adaptada)

### 2.9. Diseño de la zanja del biodigestor tubular

Las dimensiones óptimas de ancho superior (a), ancho inferior (b) y profundidad (p) dependen del tipo de suelo donde se vaya a realizar la zanja, ya que esto condicionará la inclinación de talud de las paredes (ángulo  $\alpha$ ), Suelos sueltos y arenosos necesitaran taludes de  $\alpha = 30^\circ$  a  $45^\circ$ , mientras que suelos más arcillosos estarán con taludes de  $\alpha = 7.5^\circ$  a  $30^\circ$ . En algunos casos se puede lograr hacer zanjas sin talud (sin inclinación) por lo que para este caso sería  $\alpha = 0^\circ$  (Martí, 2019). A continuación, se presenta una tabla para el diseño óptimo de la zanja en función del radio (r).

**Tabla 7.** Diseño de la zanja óptima

| Ángulo ( $\alpha^\circ$ ) | %V <sub>L</sub> | %V <sub>G</sub> | a (m)  | b (m)  | p(m)   |
|---------------------------|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| 0                         | 88              | 12              | 1.49*r | 1.49*r | 1.57*r |
| 0                         | 83              | 17              | 1.41*r | 1.41*r | 1.57*r |
| 0                         | 80              | 20              | 1.34*r | 1.34*r | 1.57*r |
| 7.5                       | 80              | 20              | 1.63*r | 1.63*r | 1.54*r |

Fuente: (Martí, 2019)

Nota: VL = volumen del líquido; VG = volumen del gas

### 2.10. Instalación del biodigestor tubular

Para la instalación del biodigestor se utilizó las dimensiones obtenidas y en base a ello se procede a construir el biodigestor tubular, que incluyó un sistema invernadero con una cubierta plástica.

### 2.11. Medición del biogás y el biol

La medición del biogás y el biol obtenido se lo realiza mediante un Gasómetro GEOTECH, propiedad de la Universidad Estatal de Bolívar y el análisis de macronutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio en el Laboratorio del GAD Provincial de Bolívar.

**Figura 2.** (a) Medición de la concentración de metano y dióxido de azufre presente en el biogás; (b) Muestras de biol para el laboratorio.



## RESULTADOS

El biodigestor fue implementado en una granja del sector conventillo, la cual dispone de un promedio anual de 10 ganados bovinos adultos con un peso promedio de 500 Kg de peso vivo, los cuales se encuentran estabulados solo en la noche. A partir de la **Tabla 1**, se tiene disponible una cantidad de 50 Kg estiércol/día

$$10 \text{ bovinos} * \frac{500 \text{ Kg peso vivo}}{1 \text{ bovino}} * \frac{8 \text{ Kg estiércol/día}}{800 \text{ Kg peso vivo}} = 50 \text{ Kg estiércol/día}$$

Sin embargo, los bovinos están estabulados solo en la noche por lo cual se utiliza la **Tabla 2** y se obtiene disponible de materia prima de 12.5 Kg estiércol/día

$$50 \text{ Kg estiércol/día} * 0.25 = 12.5 \text{ Kg estiércol/día}$$

El porcentaje de humedad de la materia prima, aplicando la ecuación (1), luego de realizar el análisis del laboratorio es del 86.05 %, y el peso seco es de 13.95 %

La estimación de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) del estiércol bobino, aplicando la ecuación (2) y la **Tabla 3**, es de 20.3, el cual se encuentra en el rango óptimo de (20 – 30)

$$\frac{C}{N} = \frac{12.5 * 40.6}{12.5 * 2} = 20.3$$

Aplicando la ecuación (3) se obtiene como resultado la cantidad de agua necesaria para la dilución al 10 % de la materia prima, obteniendo un valor de 0.46 metros cúbicos por día.

$$10 = \frac{12.5 * 40.6}{12.5 * 40.6 + W}$$

$$W = 456.8 \text{ Kg/día}$$

Con la densidad del agua tenemos:

$$W = 0.46 \text{ m}^3/\text{día}$$

La carga diaria es la cantidad de estiércol y agua mezclados que entrarán por día. Con la densidad del estiércol fresco de densidad de 1 kg/l, se calcula la cantidad de estiércol en metros cúbicos por día.

$$12.5 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} * \frac{\text{L}}{1 \text{ Kg}} = 12.5 \frac{\text{L}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.0125 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

La carga diaria será:

$$\text{Carga diaria (CD)} = 0.46 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} + 0.0125 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Carga diaria (CD)} = 0.47 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

La carga diaria CD indica la cantidad de materia prima alimentada para que el biodigestor funcione de forma continua y la producción de biogás y biol sea continua.

Utilizando la ecuación (4) y la **Tabla 4** se obtiene el volumen líquido del biodigestor tubular

$$V_L = 0.47 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 60.18 \text{ días}$$

$$V_L = 28.3 \text{ m}^3$$

Con la ecuación (6) calculamos el volumen total para el diseño:

$$V_T = 28.3 \text{ m}^3 + \frac{28.3 \text{ m}^3}{4}$$

$$V_T = 35.4 \text{ m}^3$$

Por la alta cantidad de materia prima disponible, se decide realizar tres biodigestores para un manejo adecuado por lo tanto el volumen se divide por tres, es decir, el volumen de diseño será de  $17.68 \text{ m}^3$ , por lo tanto, es necesario tres biodigestores que abarquen este volumen, con la **Tabla 6** se obtiene que las dimensiones adecuadas, resultados que se presenta en la **Tabla 8**.

**Tabla 8.** Cálculo de las dimensiones ideales del biodigestor

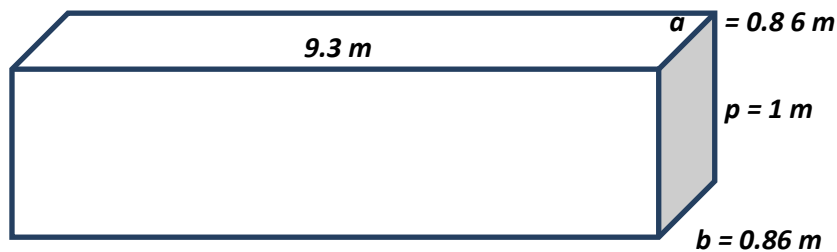
| Ancho de rollo (m) | Longitud del biodigestor (L) (m) | Diámetro (D) (m) | L/D (5-7) |
|--------------------|----------------------------------|------------------|-----------|
| 1                  | 36,8                             | 0,64             | 57,55     |
| 1.25               | 23,6                             | 0,8              | 29,46     |
| 1.5                | 16,4                             | 0,96             | 17,05     |
| 1.75               | 12,1                             | 1,12             | 10,85     |
| 2                  | 9,3                              | 1,28             | 7,25      |

La **Tabla 8** indica que el óptimo de L/D recae en un biodigestor de ancho de rollo = 2 m, Longitud = 9.3 m. Según Martí, (2008), los biodigestores del tipo bajo costo pueden ser manejables hasta 10 metros, debido a los materiales utilizados.

Las medidas de la zanja se calculan utilizando la **Tabla 7**, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 9. Dimensiones de la zanja**

| Ángulo ( $\alpha^\circ$ ) | %V <sub>L</sub> | %V <sub>B</sub> | a (m) | b (m) | p(m) |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-------|-------|------|
| 0                         | 80              | 20              | 0.86  | 0.86  | 1    |



**Figura 2. Dimensiones de la zanja**

La **Tabla 9** indica que el ancho superior e inferior de la zanja es de 0.86 m, el largo de la zanja está definido en 9.3 m, obtenido de la **Tabla 8**.

La construcción del biodigestor tubular e instalación en la zanja se realiza de acuerdo a las medidas del diseño se muestra en la **Figura 3**.

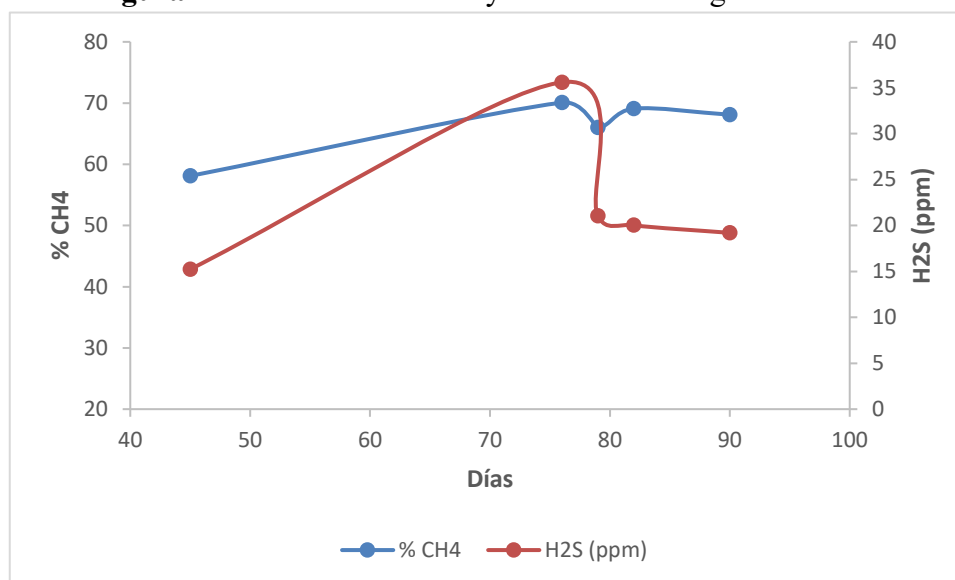
**Figura 3. Instalación del biodigestor tubular en el sector conventillo, cantón Guaranda. Provincia Bolívar.**



Las mediciones del biogás proporcionaron los siguientes valores, que se presenta en la **Tabla 10**.

**Tabla 10. Resultados del CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S medido en el biodigestor tubular con el Gasómetro GEOTECH**

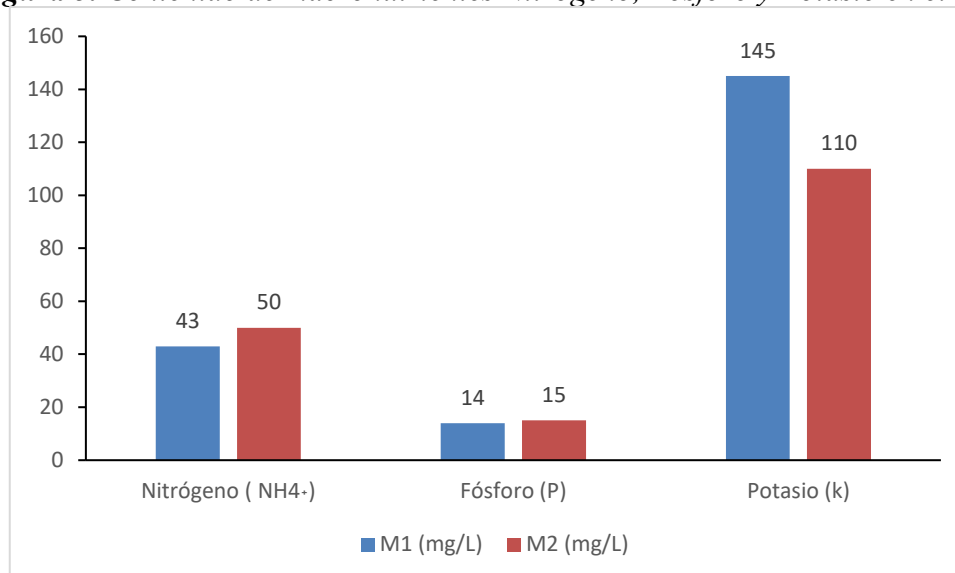
| No. Medición | % CH <sub>4</sub> | PPM H <sub>2</sub> S | Tiempo desde la primera carga     |
|--------------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1            | 58,10             | 15.23                | A los 45 días de la primera carga |
| 2            | 70.07             | 35.60                | A los 76 días de la primera carga |
| 3            | 66.00             | 21.05                | A los 79 días de la primera carga |
| 4            | 69.1              | 20.03                | A los 82 días de la primera carga |
| 5            | 68.1              | 19.20                | A los 90 días de la primera carga |

**Figura 4.** Producción de CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>S en el biodigestor tubular

En la **Figura 4** se observa que a partir del día 45 se obtiene biogás con una concentración de metano de 58.1 % y llega a un pico al día 76 con un 70.07 % de metano a los 90 días, se puede observar una disminución de gas metano CH<sub>4</sub>, porque el proceso de metanogénesis está disminuyendo ya que se ha consumido la materia orgánica disponible en sus diferentes procesos metabólicos. La presencia de gas sulfhídrico disminuye con el tiempo debido a la instalación de un filtro a base de limallas de hierro y luego de los 75 días no sobrepasa los 40 ppm, esto se debe a que el hierro reacciona con el ácido sulfhídrico que tiene concentraciones inferiores a 670 ppm y forma una capa de FeS en la superficie del hierro por lo cual el H<sub>2</sub>S queda atrapado (Mirabal et al., 1986).

El biodigestor ubicado a 2600 metros sobre el nivel del mar sobrepasa los 55 % de metan, un valor ideal planteado por autores como (Martí, 2008). Ivet et al., (2011), en la Meseta Andina (3000–4000 msnm), tratando el estiércol de vaca se obtuvo una producción específica de biogás del orden de un 65% de CH<sub>4</sub> en un biodigestor con cubierta de plástico, lo que indica que esta tecnología es adaptable a la zona andina. Poggio et al., (2009), también menciona que para materia prima de estiércol vacuno, los tiempos razonables de retención para la generación de biogás es (< 100 días), valor que se afirma en el tiempo de obtención del biogás en nuestra zona de estudio.

El biol producido en el biodigestor se sometió a un análisis químico para determinar los macronutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio, obteniendo los resultados presentados en la **Figura 5**, para dos muestras analizadas en el laboratorio.

**Figura 5.** Contenido de macronutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio en el biol

La **Figura 5**, muestra que existe nitrógeno mineral en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, sobre los 43 ppm, fósforo sobre los 14 ppm y potasio sobre los 100 ppm, estos nutrientes pueden ser asimilados por las plantas por lo que se puede utilizar como una enmienda al suelo, evitando que las excretas se acumulen en el mismo establo durante largos periodos de tiempo, para utilizarse posteriormente en la preparación del terreno en el periodo de pre-siembra, cuyo manejo puede conllevar pérdidas importantes de nitrógeno (N) por volatilización, lixiviación, y nitrificación-desnitrificación (Poggio et al., 2009). Así también las concentraciones de nutrientes obtenidos en proporciones es similar a los obtenidos por Lawrence et al., (2011) con excretas de vacuno, a condiciones de temperaturas más cálidas.

## CONCLUSIONES

La materia prima caracterizada del estiércol vacuno, presenta una humedad de 86.05 %, una relación C/N de 20.3 y cuya disponibilidad es de 12.5 Kg estiércol/día, para diluir al 10 % con el fin de utilizarlo en un biodigestor tubular se requiere un volumen de agua de 0.46 m<sup>3</sup>/día, el volumen total del biodigestor para tratar la materia prima disponible es de 35.4m<sup>3</sup>, la cual se reparte en tres biodigestores de 17.68 m<sup>3</sup> con lo cual las dimensiones del biodigestor tiene un ancho de rollo de 2 metros y longitud de 9.3 metros, construido con material de bajo costo y demuestra ser manejable produciendo biogás y biol de forma continua. La zanja implementada actúa como contención a la presión ejercida por la materia prima líquida.

El diseño propuesto evita malos olores, lixiviación, y volatilización de nutrientes esenciales en el suelo como los NPK. La producción de biogás muestra una alta calidad, evidenciada por la alta cantidad de metano sobre el 58 % lo que puede considerarse que la zona andina del Ecuador ofrece un alto potencial para la producción de biogás. En la producción existe trazas de H<sub>2</sub>S que no

sobrepasan los 40 ppm que puede ser capturado con limallas de hierro y con ello se eleva la calidad del biogás.

Los NPK obtenidos si bien no reemplazan un abono sintético pueden ser usados como enmiendas y a la vez ser mejoradas para disminuir la carga patógena para las plantas y que la aplicación sea continua a fin de alcanzar los objetivos de fertilización, lo que puede garantizar la sustentabilidad rural conjuntamente con la utilización del biogás como fuente de energía amigable con el ambiente, barata y confiable.

## FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe conflicto de intereses

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

|  | Verdezoto, L.,<br>Verdezoto, F., | Navas, A., &<br>Rodríguez, E |
|--|----------------------------------|------------------------------|
| <b>Participar activamente en:</b>                      |                                  |                              |
| Conceptualización                                      | X                                | X                            |
| Análisis formal  | X                                | X                            |
| Adquisición de fondos                                  | X                                |                              |
| Investigación  | X                                |                              |
| Metodología  |                                  | X                            |
| Administración del proyecto                            |                                  | X                            |
| Recursos   |                                  | X                            |
| Redacción –borrador original                           | X                                |                              |
| Redacción –revisión y edición                          | X                                | X                            |
| La discusión de los resultados                         | X                                | X                            |
| Revisión y aprobación de la versión final del trabajo. | X                                | X                            |

## RECONOCIMIENTO A REVISORES:

La revista reconoce el tiempo y esfuerzo del editor Alex Vinicio Gavilanes Montoya, y de revisores anónimos que dedicaron su tiempo y esfuerzo en la evaluación y mejoramiento del presente artículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. In *Proyecto CHI/00/G32*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- GADCG. (2014). *PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2014-2025 Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Guaranda Ramsses Torres Espinosa*.
- Garfí, M., Castro, L., Montero, N., Escalante, H., & Ferrer, I. (2019). Bioresource Technology Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment. *Bioresource Technology*, 274(October 2018), 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.007>
- Ivet, F., Mariana, G., Uggetti, E., Ferrer-martí, L., Arcadio, C., & Enric, V. (2011). *Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes*. 5, 3–9.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.036>

- Lawrence, Q., Wilfredo, B., & Tang, O. (2011). *Evaluación de la calidad de biogas y biol a partir de dos mezclas de estiércol de vaca en biodigestores tubulares de PVC.*
- Martí, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. In *GTZ-Energía* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.6242>
- Martí, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación.*
- Mirabal, E., Chornik, B., Ishizaki, K., & Leighton, B. (1986). Corrosión en Hierro por Acido Sulhídrico: Estudio Mediante Espectroscopía de Electrones Auger. *Latin American Journal of Melallurgy and Materials*, 6(1–2), 30–35.
- Nordell, E., Björn, A., Waern, S., Shakeri Yekta, S., Sundgren, I., & Moestedt, J. (2022). Thermal post-treatment of digestate in order to increase biogas production with simultaneous pasteurization. *Journal of Biotechnology*, 344(July 2021), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.12.007>
- Poggio, D., Ferrer, I., Batet, L., & Velo, E. (2009). *Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos.* 21(9).
- Talevi, M., Pattanayak, S. K., Das, I., Lewis, J. J., & Singha, A. K. (2022). Speaking from experience: Preferences for cooking with biogas in rural India. *Energy Economics*, 107(February 2021), 105796. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105796>
- Verdezoto-mendoza, F. P., Muyulema-allaica, J. C., Karina, A., & Verdezoto-del-salto, L. F. (2021). *Evaluación de la variabilidad climática en el cantón Chillanes mediante los parámetros de la precipitación y la temperatura parameters of precipitation and temperature.* 3, 70–84.