



## PRODUCCIÓN DE METANO DE LA EXCRETA ANIMAL PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN ALTOANDINA

### METHANE PRODUCTION FROM ANIMAL EXCRETA FOR ENERGY USE IN THE HIGH ANDEAN REGION

Victor Roman Salinas<sup>1\*</sup>, Bernardo Roque Huanca<sup>2\*</sup>, [vroman@unap.edu.pe](mailto:vroman@unap.edu.pe), [b.roque@unap.edu.pe](mailto:b.roque@unap.edu.pe)

<sup>1</sup>Universidad Nacional del Altiplano–Puno Av. Floral 1153

#### RESUMEN

La excreta fecal del ganado puede ser perjudicial para el medio ambiente si no se tiene un manejo adecuado. El trabajo tuvo como objetivo determinar la producción de metano (CH<sub>4</sub>) a partir de la excreta de ganado vacuno, como fuente alternativa de energía para uso doméstico. El método consistió en someter 8,9 kg de excreta fresca a digestión anaeróbica en biodigestor discontinuo, durante 45 días. Los resultados indican que la fermentación desarrolla una temperatura de  $31,20 \pm 0,49$  °C y un pH de  $6,98 \pm 0,17$ ; la relación entre la producción de biogás y el tiempo de fermentación fue alta ( $R^2 = 0,985$ ) y significativa ( $p < 0,05$ ), obteniéndose  $184,87 \pm 1,09$  L de biogás, con un contenido de  $62,07 \pm 1,24$  % de CH<sub>4</sub>,  $31,05 \pm 0,53$  % de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases menores, y 32,05 L de sustancia líquida como efluente (biol + biosol), con una demanda química de oxígeno (DQO) reducida en 74 % con respecto al afluente. El biogás obtenido tuvo un contenido energético de 3,466 Mcal/m<sup>3</sup>. A partir de los resultados se concluye que la fermentación anaeróbica de la excreta fecal de ganado vacuno puede ser una alternativa para la obtención de biogás de uso doméstico y biol como bioabono para la agricultura.

**Palabras clave:** Bioabono, biodigestor, biogás, biol, excreta, metano.

#### ABSTRACT

Livestock fecal excreta can be harmful to the environment if not properly managed. The research objective was to determine the production of methane (CH<sub>4</sub>) from the excreta of cattle, as an alternative source of energy for domestic use. The method consisted of subjecting 8.9 kg of fresh excreta to anaerobic digestion in a batch biodigester for 45 days. The results indicate that the fermentation develops a temperature of  $31.20 \pm 0.49$  °C and a pH of  $6.98 \pm 0.17$ ; the relationship between biogas production and fermentation time was high ( $R^2 = 0.985$ ) and significant ( $p < 0.05$ ), obtaining  $184.87 \pm 1.09$  L of biogas, with a content of  $62.07 \pm 1.24$  % of CH<sub>4</sub>,  $31.05 \pm 0.53$  % of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other minor gases, and 32.05 L of liquid substance as effluent (biol + biosol), with a chemical oxygen demand (COD) reduced by 74 % with respect to the influent. The biogas obtained had an energy content of 3,466 Mcal/m<sup>3</sup>. From the results it is concluded that the anaerobic fermentation of cattle fresh excreta can be an alternative to obtain biogas for domestic use and biol as biofertilizer for agriculture.

**Keywords:** Biofertilizer, biodigester, biogas, biol, methane, waste.

\*Autor para correspondencia: [vroman@unap.edu.pe](mailto:vroman@unap.edu.pe)

ORCID: [0000-0002-4896-8585](https://orcid.org/0000-0002-4896-8585)

Downloadable from : <http://revistas.unap.edu.pe/epg>

Av. Floral N° 1153, Ciudad Universitaria, Pabellón de la Escuela de Posgrado, tercer piso oficina de Coordinación de investigación. Teléfono (051) 363543



## INTRODUCCIÓN

La contaminación fecal de origen ganadero constituye en uno de los problemas ambientales emergentes más importantes, su deficiente manejo puede conducir a la contaminación del suelo, el agua y del aire con gases de efecto invernadero, por emisión de metano y óxido nítrico (Chadwick *et al.* 2018). Las excretas del ganado considerados como desechos agrícolas ampliamente distribuidos en el mundo, contaminan al suelo, agua y a los alimentos, con bacterias como *Escherichia coli* (Ercumen *et al.* 2017), lo que amerita mejorar las prácticas de gestión de manejo ganadero, para mitigar la contaminación ambiental (Grossi *et al.* 2019). La ganadería que domina el planeta tierra son: caprino, ovino y bovino en África, vacuno, ovino y camélidos en América del Sur, y de todos los tipos en Asia (FAO 2018), con alto contenido de materia orgánica en forma de lignocelulosa, cuya descomposición genera gases de efecto invernadero que impacta al cambio climático y la salud pública, individual y colectiva incrementando la morbilidad y mortalidad (Manisalidis *et al.* 2020). La excreta del ganado vacuno como fuente de emisión de metano (CH<sub>4</sub>), genera efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (Vijn *et al.* 2020), está considerado como uno de los desechos orgánicos más abundantes que amenaza al mundo, su almacenamiento contribuye con metano 28 veces más que CO<sub>2</sub> al calentamiento global (Grossi *et al.* 2019), la estrategia efectiva más viable y sostenible de mitigar estos efectos (Kumari *et al.* 2020), es mediante la tecnología de digestión anaeróbica que se recupera energía en forma de biogás y fertilizante en el ámbito rural (García *et al.* 2019) y proporciona desarrollo de modelos comerciales dinámicos y fluctuantes (Heiker *et al.* 2021).

La región altoandina se caracteriza por su ubicación en altitudes mayores a los 3825 m, la presión atmosférica es 471,8 mmHg, la temperatura y la disponibilidad de oxígeno son relativamente menores que condicionan el comportamiento de los gases (Shi *et al.* 2018), los procesos biológicos fermentativos que ocurren a nivel de rumen requieren mayor energía (Fan *et al.* 2020). La energía es el elemento esencial para la actividad humana en el mundo, que constituye el corazón del desarrollo humano, lo que imposibilita alcanzar

los objetivos del desarrollo social y económico sostenible, sin garantizar y acceder a una energía limpia, fiable y asequible (Sasmaz *et al.* 2020). La producción de energía es un asunto que ha atraído la atención a los investigadores en los últimos años, debido a que los recursos energéticos disponibles son agotables y dañan el medio ambiente de diversas formas, por lo que es necesario investigar las fuentes alternativas de energías renovables y limpias (Gielen *et al.* 2019). Los residuos ganaderos como los estiércoles de cerdo, aves y vacunos (Baltrénas *et al.* 2019), constituyen recursos orgánicos potenciales de materia prima, para la producción del biogás mediante proceso de digestión anaerobia (Matos *et al.* 2017).

### Gas metano

El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, incoloro, inodoro, insoluble en el agua y no polar, que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias, originado de la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los sistemas biológicos (procesos agrícolas, cultivo de arroz, fermentación entérica en los animales y desechos orgánicos en general) (Fernández 2004), por un grupo microbial filogenéticamente metanógenos llamado “archaeas” distinto de las eubacterias. El metano tiene un tiempo de vida de 12 años y es eliminado en la atmósfera por reacciones químicas (Carmona *et al.* 2005). Es el segundo gas más importante después del CO<sub>2</sub>, que contribuye al calentamiento global; para controlar las emisiones, se requiere soluciones técnicas como cambios de dieta humana que reducen el consumo de leche y carne (Höglund-Isaksson *et al.* 2020), las fuentes antropogénicas representan aproximadamente el 58 % de las emisiones globales totales de CH<sub>4</sub> (Knapp *et al.* 2014), la producción por los rumiantes se deriva del proceso digestivo (Bonilla & Lemus 2012).

### Biogás

Es un combustible generado en medios naturales o en dispositivos específicos, mediante reacciones de biodegradación de la materia orgánica, por la acción de microorganismos y otros factores en ambiente anaerobio, que está compuesto entre un 55% a 70 % de CH<sub>4</sub>, 30 a 45 %, CO<sub>2</sub> y en pequeñas proporciones de otros gases como N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S (Roubík & Mazancová 2020). El contenido energético promedio del biogás oscila entre

18,8 y 23,4 MJ/m<sup>3</sup> (Deublein & Steinhauser 2008).

En la digestión anaerobia de la materia orgánica, se obtienen biogás y fertilizante de alta calidad, compuesta de biol parte líquida y biosol parte sólida, dependiendo de las características de la sustancia a fermentar, el efluente es de aproximadamente de 85 a 90 % del afluente, el 90 % corresponde al biol y el 10 % a biosol (Carhuacho *et al.* 2012).

Los parámetros fundamentales para el eficiente proceso anaerobio, son la temperatura y el pH. La temperatura afecta directamente al crecimiento microbiana, donde las tasas de reacción química y biológica son más rápidas para mayores de 30 °C, lenta para menores de 20 °C y la digestión cesa completamente por debajo de 10 °C, pero variaciones bruscas en el digestor provocan desestabilización del proceso (FAO 2011), los rangos óptimos para el crecimiento de los microorganismos anaerobios son: psicrofílica, menores a 25 °C, con un óptimo a 15 °C, mesofílica, entre 25 °C a 45 °C, con un óptimo a 35 °C y termofílicas entre 45 °C a 65 °C, con óptimo a 55 °C (Ortega 2006). El pH es uno de los parámetros más influyentes en la producción de metano, el valor óptimo de pH para el desarrollo de microorganismos formadores de metano es de alrededor de 6,7 a 7,5 (Castro Rivera *et al.* 2020).

### Objetivos Específicos

- a) Evaluar la producción de metano de la excreta animal, mediante la digestión anaerobia mesofílica como aprovechamiento energético renovable en forma de biogás.

- b) Determinar los parámetros fundamentales que influyen en la producción del metano de la excreta del ganado vacuno mediante el biodigestor sistema batch.

- c) Analizar los beneficios ambiental y económico de los pobladores de la zona con la tecnología de digestión anaerobia con desarrollo sostenible.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la ciudad de Puno, a una altitud aproximada de 3848 m, entre las coordenadas 17°50'15" de latitud sur y 70°01'18" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a una temperatura ambiente que osciló entre -2 °C por las noches y 21 °C al medio día, con radiación solar de intensidad próxima a los 1000 W/m<sup>2</sup>.

La materia prima utilizada fue la excreta fecal fresca de vacunos, alimentados con pastos naturales de la asociación *Festuca dolychophylla* (ch'illiwa) y *Muhlenbergia fastigiata* (ch'iji) figura 1, cuya disponibilidad está íntimamente relacionada con la cantidad, peso y alimentación que recibe el ganado, por ejemplo, un vacuno de 100 kg de peso vivo, fijo en el establo produce 8 kg de excreta diario (Martí - Herrero 2008), en el lugar de estudio se dispone 4 vacunos de aproximadamente de 200 kg de peso vivo promedio y se encuentra en el establo sólo en la noche, la excreta disponible es de 16 kg.



**Figura 1.** Fotografía de establo de abastecimiento de excreta de bovino

### Muestra

Es la mezcla de excreta de vacuno y el agua en una proporción 1 a 3, (para un kilogramo de

excreta fresca de ganado corresponde 3 litros de agua), esta mezcla denominada afluente y sus características (Figura 2, y Tabla 1)

**Tabla 1.** Características de la Sustancia Afluente.

Materia prima	Masa (kg.)	Volumen ( $\times 10^{-3} \text{m}^3$ )	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH
Excreta de vaca	8,90	7,42	1199,50	18	7,8
Agua manantial	26,58	26,58	1000	16	8,5
Mezcla	35,48	34,00	1043,5	18,10	7,35

El clima en la región altoandina es muy variado y seco, la temperatura varía desde  $-10^{\circ}\text{C}$  hasta  $21^{\circ}\text{C}$  en algunas épocas del año, para establecer un clima característico de la zona tropical, con temperatura mayor a  $20^{\circ}\text{C}$ , se ha utilizado el invernadero, que consta de estructura sólida de ladrillo pandereta y armazón de madera de geometría trapezoidal, la orientación del techo fue hacia el norte geográfico con inclinación de  $17^{\circ} 17' 30''$  de latitud sur, con una pendiente de

$34,33\%$  respecto a la horizontal, garantizando el 90% de irradiación y acumular mayor cantidad de calor (Estrada 2012); también se utilizaron materiales aisladores térmicos como espuma de vidrio, lana de oveja y ichu (Spita ichu) y cubierto completamente con plástico Agrotel. La figura 3 muestra la fotografía del invernadero.

**Figura 2.** Fotografía de mezcla de excreta ganado de vacuno con agua.**Figura 3.** Fotografía del invernadero cubierto con plástico Agrotel transparente.

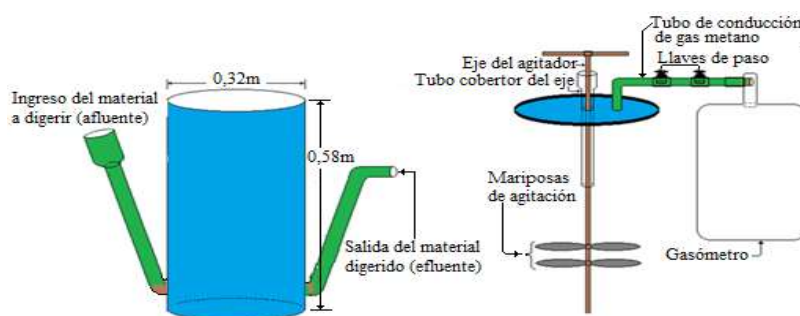
### Construcción del biodigestor discontinuo sistema Batch.

El biodigestor experimental sistema Batch consistió de un cilindro vertical de poliestireno (Bidón) de flujo discontinuo de 46 L de

volumen total, con 75 % para el sustrato y 25 % para almacenar el biogás (FAO 2019). La figura 4 muestra el biodigestor y sus componentes, y en la tabla 2 se detallan sus dimensiones.

**Tabla 2.** Dimensiones del Biodigestor Sistema Batch.

Perímetro de la sección transversal S (m)	Altura H(m)	Volumen total $V_T$ ( $\text{m}^3$ )	Volumen de sustrato $V_{\text{sust}}$ ( $\text{m}^3$ )	Volumen para el gas $V_{\text{gas}}$ ( $\text{m}^3$ )
1,00	0,58	0,046	0,034	0,012

**Figura 4.** Biodigestor y sus componentes.

### Método de investigación.

La metodología utilizada fue la técnica de digestión anaerobia de la excreta de ganado vacuno mezclado con agua no tratada (sin cloro), en un biodigestor discontinuo, colocado dentro de un invernadero. El tiempo de retención fue de 45 días, durante este periodo se han realizado las mediciones de pH, la temperatura en el interior del digestor ( $T_{\text{digest}}$ ),  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y el volumen del biogás. También se realizaron el análisis físicoquímico de los substratos afluente y efluente, en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química, determinando el contenido de materia orgánica

(MO), carbono total (C), fósforo total (P), demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Los instrumentos de medición fueron los sensores digitales: Sampling Data-Logger CM-0191 50 %  $\text{CO}_2$  y 100 %  $\text{CH}_4$  para cuantificar el  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  y , de temperatura y pH PASPORT, que trabajan con interface SPARK - PS-2008 y el software SPARKvue. El ajuste de regresión lineal se aplicó a los resultados obtenidos de la producción de metano, parámetros de pH y temperatura de trabajo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron como resultado el biogás aproximadamente de  $(184,87 \pm 1,09)$  L, en la tabla 3 y en la figura 5, se muestran la producción de biogás, mediante el ajuste de regresión lineal se ha obtenido la tendencia lineal con pendiente 5,8745 y  $R^2=0,9856$ , cuya ecuación de producción del biogás es  $y =$

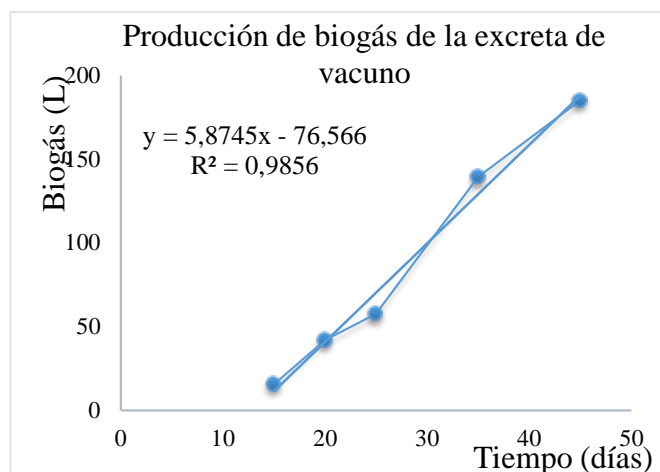
$5,875x - 76,6$ , la relación entre la producción de biogás y el día de la fermentación fue significativa ( $p < 0,05$ ), con una alta bondad de ajuste ( $R^2 = 0,9855$ ). El contenido del biogás fue  $(62,07 \pm 1,43)$  % de ( $\text{CH}_4$ ),  $(31,05 \pm 0,73)$  % de  $\text{CO}_2$ , los resultados se muestran en la tabla 4 y en la figura 6.

**Tabla 3.** Resultados de la Digestión Anaeróbica.

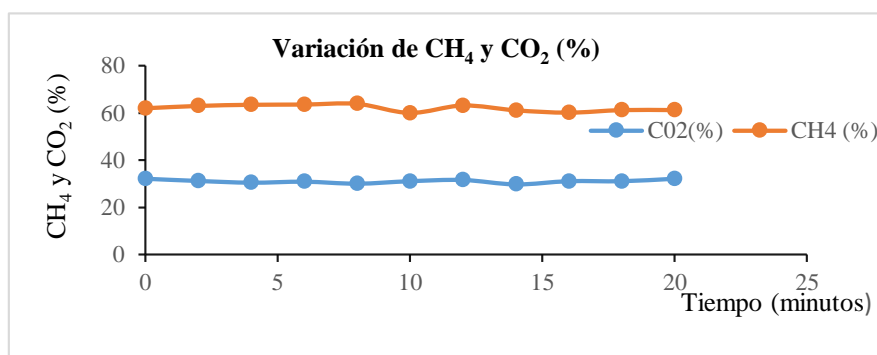
Biodigestor	Sustancia	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Volumen ( $\times 10^{-3} \text{m}^3$ )	Masa ( $10^{-3} \text{kg}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH
<b>Bidón</b>	Biogás	1,2	184,87	222	--	--
	Biol + Biosol	1100	32,05	35258	31,0 $^{\circ}\text{C}$	7,35

**Tabla 4.** Valores de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , a los 30 días del proceso.

Tiempo(min)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<b><math>\text{CO}_2</math>(%)</b>	32,1	31,2	30,5	30,9	30,1	31,1	31,6	29,8	31,1	31,1	32,1
<b><math>\text{CH}_4</math>(%)</b>	62,0	63,0	63,5	63,6	63,9	60,0	63,2	61,1	60,1	61,2	61,2
<b>Promedios (<math>x \pm s</math>)</b> $\text{CH}_4 = 62,07 \% \pm 1,43$ y Promedio $\text{CO}_2 = 31,05 \% \pm 0,73$											



**Figura 5.** Producción de metano contenido en biogás



**Figura 6.** Concentración de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, a los 30 días del proceso.

El contenido energético del metano contenido en el biogás, fue de 3,466 Mcal/m<sup>3</sup>, cuyo

procedimiento matemático, se detallan a continuación.

**Tabla 5.** Cuantificación de los componentes del biogás y contenido energético

Gas	%	(Litros)	(moles)	(kcal)
CH <sub>4</sub>	62,07	114,75	3,010	640,8
CO <sub>2</sub>	31,05	57,40	1,506	
Otros	6,88	12,72	0,334	
<b>Total</b>	100	184,87	4,850	640,8

El calor de combustión del metano (CH<sub>4</sub>) a condiciones estándar de presión y temperatura es de 890,71 kJ/mol (Pittam & Pilcher 1972), para 1kcal = 4,184 kJ (Hargrove 2006), esta cantidad equivale a 212,885 kcal/mol. Un mol de cualquier gas en condiciones estándar de temperatura y presión estándar (273,15 K, 0 °C o 32 °F; 760 mm Hg o 1 atm) ocupa 22,4 L de volumen molar (Helmenstine 2021). A partir de los datos de la NASA se han generado la

siguiente ecuación polinómica, a fin de calcular la presión atmosférica (y, mmHg), en función de la altitud (x, m),  $y = 2 \times 10^{-6} x^2 - 0,0811x + 752,78$  ( $R^2 = 0,9995$ ), para  $x=3812$  m de altitud (nivel del lago Titicaca), la presión atmosférica resulta 472,7 mmHg, mediante la Ley de Boyle  $P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2$ , se ha comparado este resultado a las condiciones cambiantes de un



gas según el cambio de la presión y temperatura. Para los valores  $P_1=760$  mmHg,  $T_1=273,15$  K ( $0^\circ\text{C}$ ) y  $V_1=22,4$  L a nivel del mar. A una altitud de 3812 m,  $P_2=472,7$  mmHg y la temperatura del aire fue de  $16^\circ\text{C}$  ( $T_2=289,15$  K), 1 mol de gas ocupa 38,124 L. El biogás obtenido, con  $(62,07 \pm 1,24)$  % de  $(\text{CH}_4)$  y  $(31,05 \pm 0,53)$  % de  $(\text{CO}_2)$  en volumen, contiene 114,75 L de  $\text{CH}_4$ , 57,40 L de  $\text{CO}_2$  y 12,72 L de otros gases tabla 5. A partir de estos los resultados, el biogás obtenido de la excreta de vacuno tiene un contenido energético de  $3,466$  Mcal/ $\text{m}^3$ , lo cual es mucho menor a la energía obtenida en el biogás de estiércol de cuyes con  $6,527$  Mcal/ $\text{m}^3$ , correspondiente a 72,3 % de metano (Palacios *et al.* 2020). El valor de la energía del biogás con 62,07 % de metano que forma parte del producto, varía desde 4800 hasta 6900 kcal/ $\text{m}^3$  (Seman *et al.* 2019). El biogás de estiércol animal crudo contiene 55-65 % de  $\text{CH}_4$ , 30 - 45% de  $\text{CO}_2$ , trazas de  $\text{H}_2\text{S}$  e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), y fracciones de vapor de agua, con un valor calorífico de 20-26 MJ/ $\text{m}^3$  (537-700 Btu/ $\text{ft}^3$ ) en comparación con el valor calorífico del gas natural de calidad comercial de 39 MJ/ $\text{m}^3$  (1028 Btu/ $\text{ft}^3$ ) (Admin 2019).

Según (Pannuchaoenwong *et al.* 2017), el biogás con contenido de metano esta entre 55 a 70 % , el poder calorífico se encuentra entre 3,583 y 7,167 Mcal/ $\text{m}^3$ , bajo condiciones de pH neutro y temperatura mesofílica óptima ( $35^\circ\text{C}$ ) promedio, el poder calorífico se encontraría superior a los 7,92 Mcal/ $\text{m}^3$  (Unpaprom *et al.* 2021; Kulkarni & Ghanegaonkar 2019 y Bond & Templeton 2011). Otro criterio utilizado para

determinar el poder calorífico del biogás es la relación metano bióxido de carbono ( $R=\text{CH}_4/\text{CO}_2$ ) (Gheorghe *et al.* 2017), en donde para  $R=0,71$  corresponde 3,44 Mcal/ $\text{m}^3$ , para los resultados obtenidos de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , el valor de  $(\text{CH}_4/\text{CO}_2)$  supera a 0,7, lo que indica que el poder calorífico de biogás obtenido es mayor a 9,08 Mcal/ $\text{m}^3$ . El biogás con más de 60% de metano, siempre contiene sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) que se elimina con esponja de hierro para evitar el deterioro de las componentes de conducción del biogás por corrosión (Barrera-Cardoso *et al.* 2020).

Los parámetros fundamentales de operación fueron el potencial de hidrogeno pH y la temperatura de trabajo que se muestran en la tabla 6, el valor de pH fue de  $6,98 \pm 0,17$ , la temperatura fue de  $31,20 \pm 0,49^\circ\text{C}$ ., en las figuras 7 y 8 se muestran la variación de pH y la temperatura de trabajo.

El valor de pH entre 6,5 y 7,5 es el valor neutro (FAO 2019), requisito importante para la óptima tasa de biometanización, donde la desintegración y la hidrólisis de la materia toma menor tiempo en completarse todo el proceso (Esposito *et al.* 2012); además la fermentación anaerobia genera biogás con 59,12 % de metano de estiércol de vaca (Kalsum & Muchtar 2020) y de los residuos sólidos orgánicos(Castro *et al.* 2020), lo que implica para pH neutro, el crecimiento de los microorganismos metanogénicos es óptimo (Haryanto *et al.* 2018).

**Tabla 6.** Variación promedio de pH y temperatura de trabajo ( $T_{\text{diges}}$ ).

Tiempo(días)	5	10	15	20	25	30	35	40	45
pH(%)	7,10	7,14	7,12	7,30	6,92	7,02	6,82	6,72	6,67
$T_{\text{diges}}(^{\circ}\text{C})$	31,1	30,5	31,2	32,1	31,6	30,9	32,1	31,2	30,1

Promedios ( $x \pm s$ ): pH =  $(6,98 \pm 0,17)$  % y  $T_{\text{diges}} = (31,20 \pm 0,49)^\circ\text{C}$

La temperatura de trabajo promedio fue de  $31,20^\circ\text{C}$ , los resultados se muestran en la tabla 6, en la figura 8 se muestra el ajuste lineal, con la pendiente de 0,01774, punto de intersección de 30,946 y  $R^2=0,1453$ , este resultado se encuentra en rango mesofílico (Criollo 2017; Reyes 2017), donde la producción de metano de la excreta de vaca en un sistema batch, completa la digestión anaeróbica (García *et al.* 2020; Ukpai & Nnabuchi 2012). Además, en este rango tuvo mayor presencia de materiales

degradables y carbohidratos necesarios para la fermentación (Achinas *et al.* 2018) y mejor transferencia de los electrones entre especies en comunidades microbianas para la producción de metano(Lin *et al.* 2018).

El resultado del análisis físico químico de las sustancias afluente y efluente se muestran en la (Tabla 7). La sustancia efluente fue de 32,05 L, con demanda química de oxígeno (DQO) reducido en 74 % con respecto a la sustancia afluente, la relación de Carbono Nitrógeno

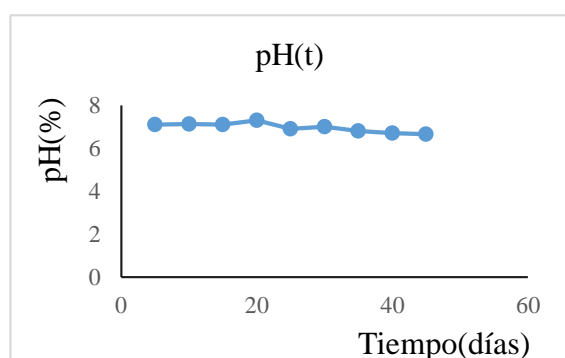
(C/N), para las sustancias afluente y efluentes fueron 33,88 y 36,88, respectivamente, el mejor rendimiento de metano mediante la digestión anaeróbica a pH estable y libre de  $\text{NH}_3$ , se encuentra para C/N= 30 (Wang *et al.* 2012), y

con respecto al sustrato efluente con C/N=36,88, la materia orgánica se descompone lentamente por escasa cantidad de energía para su descomposición o ha terminado su proceso.

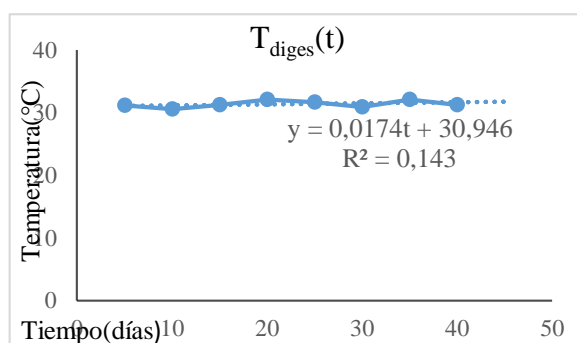
**Tabla 7.** Características Físico-químicas de la Sustancia Afluente y Efluente.

Componentes	Materia Orgánica	Carbono total (C)	Fosforo total (P)	Nitrógeno (NK)	DQO	Relación (C/N)
Afluente	82,76 %	48,12 %	9,95 %	1,42 %	230 mg/L	33,88
Efluente	84,37 %	49,05 %	8,92 %	1,33 %	59,93 mg/L	36,88

Fuente: Laboratorio de Ingeniería Química (U.N.A.- PUNO, 2018).



**Figura 7.** Variación de pH durante el proceso.



**Figura 8.** Temperatura promedio en el interior del biodigestor.

### Beneficios ambientales y económicos

El uso de metano como energía limpia y renovable, evita la tala indiscriminada de bosques y desequilibrio en la naturaleza por la deforestación (Knapp *et al.* 2014), humaniza el trabajo de las personas dedicadas a la actividad agropecuaria al utilizar biogás en sustitución leña y bostas para la cocción de alimentos. Los microorganismos infectocontagiosas que abundan en la excreta, son eliminados mediante el procesamiento anaeróbico en el biodigestor a

temperatura mesófila y pH neutro (Ukpai & Nnabuchi 2012), implicando que la biotecnología anaeróbica juega un papel importante en el control de la contaminación, la obtención de energía y productos con valor agregado (FAO 2011). Si cada ganado tiene peso vivo de 200 kg, de alimentación de pastos naturales y son exclusivamente de pastoreo, generaría excreta de aproximadamente 4 kg cada uno (Martí-Herrero 2008), se requiere 02 bovinos para producir 166 L de biogás con 62,07 % de metano que equivale a 103 L de  $\text{CH}_4$ . El biogás como recurso energético renovable, proveniente de residuos agropecuarios, agroindustriales y municipales (Reyes 2017), puede ser utilizada como combustible para generar electricidad en áreas rurales, contribuyendo a la implementación de políticas ambientales y sociales (Freitas *et al.* 2019), el biol estabilizada se utilizada en irrigación como foliador y el biosol como fertilizante para cultivos (León *et al.* 2019).

La tecnología de digestión anaeróbica para la producción de metano de la excreta de vacuno, mitiga la emisión de gases de efecto invernadero de aproximadamente el 19 % del calentamiento total de todas las fuentes antropogénicas (Black, Davison & Box 2021), al mismo tiempo en la región del altiplano de Puno, genera desarrollo económico y ambiental sostenible (Vasco *et al.* 2019), como una forma de recuperar los recursos biológicos considerados como desechos, conservación del ecosistema y reduciendo la dependencia de recursos naturales finitos (Wainaina *et al.* 2020), elimina los contaminantes patógenos en porcentaje desde el 65 % al 100 % en algunos casos (Jose & Reina 2020).

La tabla 8, muestra la producción estimada de biogás para un poblador que cuenta con 8



cabezas de ganado vacuno de 200 kg de peso vivo aproximadamente, fijo en establo durante 24 horas y exclusivamente de pastoreo. La cantidad de  $(184,87 \pm 1,09)$  L de biogás compuesto de metano mayor al 55 %, acumula energía calorífica entre 0,96 kWh a 1,20 kWh (Deublein & Steinhauser 2008), y un metro cúbico de biogás puede generar una energía eléctrica de 2,5 kWh (Uddin *et al.* 2016), con 128 kg de excreta fresca se obtendría 2660,67 L de biogás, que equivale a la energía calorífica

acumulada entre 13,895 kWh a 17,294 kWh, para el costo de la energía eléctrica en la región de Puno por 1kWh que es de S/. 0,4908, el poblador de la región de Puno con 08 vacas de 200 kg de peso vivo y fijo en el establo, tendría un ingreso mensual entre S/ 204,58 a S/ 254,64 al vender el biogás producido en sustitución de la energía eléctrica. La tabla 9 muestra la rentabilidad económica del uso de biogás comparado con la energía eléctrica en la ciudad de Puno.

**Tabla 8.** Cantidad de Bovino que produce Excreta y Biogás.

Cantidad de vacuno de peso promedio 200 kg	Masa de excreta fresca acumulada (kg) en el establo			Biogás para excreta acumulada (L)	
	24 horas	Solo en la noche	en la	24 horas	Solo en la noche
6	96	24		1995,51	498,88
8	128	32		2660,67	665,17
10	160	40		3325,84	831,46

**Tabla 9.** Rentabilidad Económica de Biogás comparado con la Energía Eléctrica.

Cantidad de vacuno	Excreta fresca acumulada (Kg)	Biogás (L)	Energía acumulada (kWh)	Rentabilidad económica mensual (S/).
6	96	1995,51	10,421 – 12,971	153,438 - 190,982
8	128	2660,67	13,895 – 17,294	204,585 - 254,642
10	160	3325,84	17,368 – 21,618	255,731 - 318,303

El biogás producido de la excreta de bovino mediante digestión anaeróbica, puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica y/o térmica (Freitas *et al.* 2019) como energía limpia y renovable (Bijarchiyan *et al.* 2020), que satisface la demanda de energía interna térmica para la cocción, agua caliente sanitaria y fertilizante para la agricultura o su venta directa como gas en sustitución de combustibles fósiles, agregando valor a los residuos desechados, promoviendo el desarrollo en el sector rural (Schiochet *et al.* 2020).

La tecnología de la digestión anaeróbica para producir biogás de la biomasa, es una opción ecológicamente racional que proporciona fuente de energía limpia, renovable y barata, que genera beneficios ambientales en la sociedad (Fatin & Kalsum 2021),

contribuyendo a la mitigación del cambio climático, la contaminación y la inseguridad energética (Indrawan *et al.* 2018), como una alternativa viable de sustitución de los combustibles fósiles convencionales (Alavi-Borazjani *et al.* 2020). La fertilización edáfica con biol y biosol balanceados, en condiciones de estrés hídrico y alta radiación solar, contrarresta en un 67 % el ataque de hongo patógeno *Macrophomina phaseolina* a la soya causando pudrición carbonosa y el biosol mezclado con urea permite conservar la humedad del suelo reduciendo el estrés hídrico de las plantas (Morales 2021).

El biol se considera como fitoestimulante complejo que incrementa mayor capacidad de fotosíntesis (Condori-Mamani *et al.* 2017), su aplicación en la producción agroecológica de

lechuga tiene mejores resultados, manteniendo características fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas dentro los límites de las normas técnicas estandarizadas y de apariencia originales (Cotrina *et al.* 2020), y por lo tanto, se puede considerar al biol como un acondicionador de suelos que incrementa la biomasa de las especies vegetales (Jose & Reina 2020), y abono foliar de fuente orgánica Fitoregulator de las plantas (Carhuacho, Guerrero & Ramirez 2012).

## CONCLUSIONES

La digestión anaeróbica de 8,9 kg de excreta de vacuno, a temperatura mesofílica, posibilita obtener una producción de  $(184,87 \pm 1,09)$  L de biogás compuesto de  $62,07 \pm 1,24$  % de  $\text{CH}_4$  y  $31,05 \pm 0,53$  % de  $\text{CO}_2$ , con un poder calórico  $3,466 \text{ Mcal/m}^3$ .

Los parámetros fundamentales que influyen en la producción de metano, fueron la temperatura de trabajo en rango mesofílico de  $31,20 \pm 0,5$  °C, sin cambios bruscos durante el proceso, el potencial de hidrógeno (pH) neutro de 6,98 y una relación carbono nitrógeno (C/N) de 33,88 afluente y 36,88 efluente.

Los beneficios que genera la digestión anaeróbica del estiércol de vacuno se expresan con una menor contaminación del suelo y el aire, con beneficios económicos por ser el biogás un sustituto del gas licuado de petróleo, y la producción de biol como bioabono para la agricultura.

## AGRADECIMIENTOS

Al programa de doctorado de Ciencia Tecnología y medio ambiente (CTMA), a los fundadores, autoridades que conducen, la plana de docentes que imparten su experiencia académica en aras del desarrollo de la ciencia y la tecnología en la Universidad Nacional Altiplano - Puno.

A PhD. Bernardo Roque Huanca, asesor de la tesis, por su apoyo incesante que ha permitido todo el desarrollo del trabajo de investigación.

A los miembros integrantes del jurado dictaminador, Doctores: Roberto Floro, Gallegos Acero, Eliseo Pelagio, Fernández

Ruelas y Antonio Holguino Huarza, que sus aportes académicos de carácter científico, contribuyeron en el desarrollo del proyecto y la conclusión de la tesis final.

## REFERENCIAS

- Achinas, Spyridon, Yu Li, Vasileios Achinas, Gerrit Jan, and Willem Euverink. 2018. "Influence of Sheep Manure Addition on Biogas Potential and Methanogenic Communities during Cow Dung Digestion under Mesophilic Conditions," 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.03.003>.
- Admin, Lpelc. 2019. "Biogas Utilization and Cleanup." *Livestock and Poultry Environmental Learning Community*, 2019.
- Alavi-Borazjani, S. Azadeh, Isabel Capela, and Luís A.C. Tarelho. 2020. "Over-Acidification Control Strategies for Enhanced Biogas Production from Anaerobic Digestion: A Review." *Biomass and Bioenergy* 143 (June): 105833. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105833>.
- Amer, Haidy. 2020. "The Impact of Renewable Energy Consumption on the Human Development Index in Selected Countries: Panel Analysis (1990-2015)." *International Journal of Economy, Energy and Environment* 5 (4): 47–68. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20200504.12>.
- Baltrėnas, Pranas, Vitalij Kolodynskij, and Davyd Urbanas. 2019. "Biogas Production from Chicken Manure at Different Organic Loadings Using a Special Zeolite Additive (ZeoVit Sorbent)." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 11 (063101): 1–11. <https://doi.org/10.1063/1.5119840>.
- Barrera-Cardoso, Ernesto, Leyanet Odales-Bernal, Annerys Carabeo-Pérez, and Yasmani Alba-Reyes. 2020. "Recopilación de Aspectos Teóricos Sobre Las Tecnologías de Producción de Biogás a Escala Rural." *Tecnología Química* 40 (2): 303–21.
- Bijarchiyan, Mohadeseh, Hadi Sahebi, and Saeed Mirzamohammadi. 2020. "A Sustainable Biomass Network Design Model for Bioenergy Production by Anaerobic Digestion Technology: Using

- Agricultural Residues and Livestock Manure.” *Energy, Sustainability and Society* 10 (1): 1–17.  
<https://doi.org/10.1186/s13705-020-00252-7>.
- Black, John L., Thomas M. Davison, and Ilona Box. 2021. “Methane Emissions from Ruminants in Australia: Mitigation Potential and Applicability of Mitigation Strategies.” *Animals* 11 (4): 1–20.  
<https://doi.org/10.3390/ani11040951>.
- Bond, Tom, and Michael R. Templeton. 2011. “History and Future of Domestic Biogas Plants in the Developing World.” *Energy for Sustainable Development* 15 (4): 347–54.  
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>.
- Bonilla Cárdenas, Jorge Armando, and Clemente Lemus Flores. 2012. “Emisión de Metano Entérico Por Rumiantes y Su Contribución Al Calentamiento Global y Al Cambio Climático. Revisión.” *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias* 3 (2): 215–46.
- Carhuanchu, Fanny ., Juan . Guerrero, and Judith . Ramirez. 2012. “Aprovechamiento Del Estiércol de Gallina Para La Elaboración de Biol En Biodigestores Tipo Batch Como Propuesta Al Manejo de Residuo Avícola.” *XIX Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente (XIX - SPES)*, no. 2010: 12–17pp.  
<http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i1.773>
- Carmona, Juan C, Diana M Bolívar, and Luis A Giraldo. 2005. “El Gas Metano En La Producción Ganadera y Alternativas Para Medir Sus Emisiones y Amenorar Su Impacto a Nivel Ambiental y Productivo.” *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*.
- Castro Rivera, Rigoberto, María Myrna Solís Oba, Vanesa Chicatto Gasperín, and Aída Solís Oba. 2020. “Biogas Production through Co-Digestion of Cattle Waste and Agricultural Residues of Tomato Cultivation (*Solanum Lycopersicum* L.).” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 36 (3): 529–39.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.53545>.
- Chadwick, D R, L M Cardenas, M S Dhanoa, N Donovan, T Misselbrook, J R Williams, R E Thorman, et al. 2018. “The Contribution of Cattle Urine and Dung to Nitrous Oxide Emissions: Quantification of Country Specific Emission Factors and Implications for National Inventories.” *Science of the Total Environment* 635: 607–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.152>.
- Condori-Mamani, Pastor, Manuel Gregorio Loza-Murguía, Humberto Nelson Sainz-Mendoza, Jorge Guzmán-Calla, Francisco Mamani-Pati, Félix Marza-Mamani, and Diego Eddy Gutiérrez-González. 2017. “Evaluación Del Efecto Del Biol Sobre Catorce Accesiones de Papa Nativa (*Solanum* Ssp.) En La Estación Experimental Kallutaca .” *Journal of the Selva Andina Biosphere* 5 (1): 15–28.  
<https://doi.org/10.36610/j.jsab.2017.050100015>.
- Cotrina Cabello, Guillermo Gomer, Lorgio Noel Masgo Sanchez, Yosely Yomayra Tumbay Ambrocio, Italo Wile Alejos Patiño, Pedro Córdova Mendoza, and Alberto Rivelino Patiño Rivera. 2020. “Efectos Del Biol y Súper Biol En La Producción Agroecológica de La Lechuga (*Lactuca Sativa*) Variedad Seda En El Centro Poblado de Chinchopampa – Chaglla – Pachitea – Huánuco.” *Journal of the Academy*, no. 3: 17–31.  
<https://doi.org/10.47058/joa3.2>.
- Criollo Brayhan, Alvarado Jose David y Numpaque Humberto. 2017. “Control Pid De Temperatura Y Dosificación De Ph Para La Producción De Gas Metano a Partir De La Digestión Anaeróbica De Residuos Sólidos Orgánicos.” *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)* 2 (24).  
<https://doi.org/10.24054/16927257.v24.n24.2014.2339>.
- Deublein, D. & Steinheuser, A. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources and Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA. Weinheim. 443p.
- Ercumen, Ayse, Amy J Pickering, Laura H Kwong, Benjamin F Arnold, Sarker Masud Parvez, Mahfuja Alam, Debashis Sen, et al. 2017. “Animal Feces Contribute to Domestic Fecal Contamination: Evidence from *E. Coli* Measured in Water, Hands, Food, Flies, and Soil in Bangladesh.” *Environmental Science & Technology* 91: 8725–34.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01710>.
- Esposito, Giovanni, Luigi Frunzo, Flavia Liotta,

- Antonio Panico, and Francesco Pirozzi. 2012. "Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates," 1–8.
- Estrada Paredes, Juan José Consultor especialista / Representación FAO Bolivia. 2012. "Invernaderos o Fitotoldos." *Guía Para La Construcción de Invernaderos o Fitotoldos Una Alternativa Para Garantizar La Seguridad y Soberanía Alimentaria En Emergencias*.
- Fan, Qingshan, Metha Wanapat, Tianhai Yan, and Fujiang Hou. 2020. "Altitude Influences Microbial Diversity and Herbage Fermentation in the Rumen of Yaks." *BMC Microbiology* 20 (370): 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02054-5>.
- FAO. 2018. *World Livestock: Transforming the Livestock Sector through the Sustainable Development Goals*. Rome: Food and Agricultural Organization.
- FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF. 2011. "Manual Del Biogás." *Proyecto CHI/00/G32*, 120. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
- Fatin, Muhammad Hanif, and A Husaini Leila Kalsum. 2021. "Effect of Adding Palm Oil Mill Effluent ( POME ) and Slurry on Biogas From Cow Manure to Produced Methane Gas" 7: 75–80.
- Fernandez, Julia Martínez y Adrián. 2004. *Cambio Climático Instituto Nacional de Ecología. Secretaria Del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Primera Ed. Mexico.
- Freitas, F. F., S. S. De Souza, L. R.A. Ferreira, R. B. Otto, F. J. Alessio, S. N.M. De Souza, O. J. Venturini, and O. H. Ando Junior. 2019. "The Brazilian Market of Distributed Biogas Generation: Overview, Technological Development and Case Study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101 (October 2018): 146–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>.
- García, Andrés, Diego Rojas, Jhessica Mosquera, Ana Paola Becerra, Paola Acevedo, and Iván Cabeza. 2020. "Evaluación de La Producción de Biogás a Partir de La Digestión Anaeróbica de Tamos de Arroz Pre-Tratado." *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/806>.
- Garcia, Natalia Herrero, Andrea Mattioli, Aida Gil, Nicola Frison, Federico Battista, and David Bolzonella. 2019. "Evaluation of the Methane Potential of Different Agricultural and Food Processing Substrates for Improved Biogas Production in Rural Areas." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112 (August 2018): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.040>.
- Gheorghe, Lăzăroiu, Mihăescu Lucian, Mavrodin Mădălina, and Bondrea Andreea. 2017. "Influence of Energy Characteristics of Biogas Obtained by Anaerobic Fermentation of Animal Proteins on Combustion Performance." *2017 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017 - Proceedings* 2017-Janua: 245–49. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2017.8123326>.
- Gielen, Dolf, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D Bazilian, Nicholas Wagner, and Ricardo Gorini. 2019. "The Role of Renewable Energy in the Global Energy Transformation." *Energy Strategy Reviews* 24: 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
- Grossi, Giampiero, Pietro Goglio, Andrea Vitali, and Adrian G Williams. 2019. "Livestock and Climate Change : Impact of Live- Stock on Climate and Mitigation Strategies" 9 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>.
- Hargrove, James L. 2006. "History of the Calorie in Nutrition." *Journal of Nutrition* 136 (12): 2957–61. <https://doi.org/10.1093/jn/136.12.2957>.
- Haryanto, A., B. P. Sugara, M. Telaumbanua, and R. A.B. Rosadi. 2018. "Anaerobic Co-Digestion of Cow Dung and Rice Straw to Produce Biogas Using Semi-Continuous Flow Digester: Effect of Urea Addition." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 147 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/147/1/012032>.
- Heiker, Mathias, Matthias Kraume, Anica

- Mertins, Tim Wawer, and Sandra Rosenberger. 2021. "Biogas Plants in Renewable Energy Systems—a Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production." *Applied Sciences (Switzerland)* 11 (8). <https://doi.org/10.3390/app11083361>.
- Helmenstine, Annie Marie. 2021. "Learn About STP in Chemistry: Understanding Standard Temperature and Pressure." February 01, 2021. 2021.
- Höglund-Isaksson, Lena, Adriana Gómez-Sanabria, Zbigniew Klimont, Peter Rafaj, and Wolfgang Schöpp. 2020. "Technical Potentials and Costs for Reducing Global Anthropogenic Methane Emissions in the 2050 Timeframe—Results from the Gains Model." *Environmental Research Communications* 2 (2). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab7457>.
- Indrawan, Natarianto, Sunil Thapa, Muhammad Ery Wijaya, Muhammad Ridwan, and Don Hee Park. 2018. "The Biogas Development in the Indonesian Power Generation Sector." *Environmental Development* 25: 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.10.003>.
- Jose, Christian, and Rojas Reina. 2020. "Estudio Integral de Un Biodigestor Desde El Punto de Vista Microbiológico y Uso Del Biol Como Bioabono En Los Llanos Orientales de Colombia the Eastern Plains of Colombia," 123–28.
- Juliana Vasco-Correa, Sami Khanal, Ashish Manandhar, Ajay Shah\*. 2019. "Anaerobic Digestion for Bioenergy Production: Global Status, Environmental and Techno\_economic Implications, and Government Policie." *Reseachgate*, no. 509: 1–21.
- Kalsum, Leila, and Zainuddin Muchtar. 2020. "The Analysis Of Biogas Fermentation Time From Cow Manure On Fixed Dome Biodigester Batch Systems The Analysis Of Biogas Fermentation Time From Cow Manure On Fixed Dome Biodigester Batch Systems." <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012043>.
- Knapp, J. R., G. L. Laur, P. A. Vadas, W. P. Weiss, and J. M. Tricarico. 2014. "Invited Review: Enteric Methane in Dairy Cattle Production: Quantifying the Opportunities and Impact of Reducing Emissions." *Journal of Dairy Science* 97 (6): 3231–61. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>.
- Kulkarni, Milind Balbhim, and P. M. Ghanegaonkar. 2019. "Methane Enrichment of Biogas Produced from Floral Waste: A Potential Energy Source for Rural India." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 41 (22): 2757–68. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1571126>.
- Kumari, Shilpi, R. K. Fagodiya, Moonmoon Hiloidhari, R. P. Dahiya, and Amit Kumar. 2020. "Methane Production and Estimation from Livestock Husbandry: A Mechanistic Understanding and Emerging Mitigation Options." *Science of the Total Environment* 709: 136135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136135>.
- León Torres, Carlos Alberto, Carlos Nomberto Rodríguez, Gerson Allen Mendoza Avalos, Cecilia Betzabet Bardales Vásquez, Jeisson Cabos Sánchez, and Miguel Angel Barrena Gurbillón. 2019. "Diseño e Implementación de Una Planta Piloto de Producción de Biogás, Biol y Biosol." *Arnaldoa* 26 (3): 1017–32. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26311>.
- Lin, Richen, Jun Cheng, Lingkan Ding, and Jerry D. Murphy. 2018. "Improved Efficiency of Anaerobic Digestion through Direct Interspecies Electron Transfer at Mesophilic and Thermophilic Temperature Ranges." *Chemical Engineering Journal* 350: 681–91. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.173>.
- Manisalidis, Ioannis, Elisavet Stavropoulou, Agathangelos Stavropoulos, and Eugenia Bezirtzoglou. 2020. "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review." *Frontiers in Public Health* 8 (14): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- Martí Ortega, Nuria. 2006. "Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process." *Digestion*, 25.
- Matos, Camila F, Juliana L Paes, Érika F M Pinheiro, and David V B De Campos. 2017. "Biogas Production from Dairy Cattle Manure, under Organic and Conventional Production Systems." *Eng.*



- Agríc., Jaboticabal* 37 (6): 1081–90.
- Morales, Victoria Eugenia. 2021. “Macrophomina Phaseolina EN SOYA FERTILIZADA CON LOS” 33 (2): 91–104.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2019. *Guía Teórico-Práctica Sobre El Biogás y Los Biodigestores*. Buenos Aires - Argentina.
- Palacios, Lessly K, Gabriela Obregón, Jhonny Wilfredo Valverde, Carlos Alberto Castañeda, and Elmer G Benites. 2020. “Calorific Value of Biogas Obtained by Cavia Porcellus Biomass.” *Chemical Engineering Transactions* 80: 271–76. <https://doi.org/10.3303/CET2080046>.
- Pannucharoenwong, Nattadon, Atichit Worasaen, Chatchai Benjapiyaporn, Jarinee Jongpluempiti, and Ponthepong Vengsungnle. 2017. “Comparison of Bio-Methane Gas Wobbe Index in Different Animal Manure Substrate.” *Energy Procedia* 138: 273–77. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.056>.
- Pittam, D A, and G Pilcher. 1972. “Measurements of Heats of Combustion by Flame Calorimetry. Part 8.- Methane, Etane, Propane, n-Butane and 2-Methylpropane.” *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases* 68 (0): 2224–29. <https://doi.org/10.1039/f19726802224>.
- Reyes, Edwin. 2017. “Generacion de Biogas Mediante El Proceso de Digestion Anaerobia, a Partir Del Aprovechamiento de Sustrato Organico.” *Farem* 17 (5): 11–22.
- Roubík, Hynek, and Jana Mazancová. 2020. “Suitability of Small-Scale Biogas Systems Based on Livestock Manure for the Rural Areas of Sumatra.” *Environmental Development* 33 (April 2019): 100505. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.10.0505>.
- Sasmaz, Mahmut Unsal, Emre Sakar, and Yunus Emre Yayla. 2020. “The Relationship between Renewable Energy and Human Development in OECD Countries: A Panel Data Analysis.” *Sustainability* 12 (7450): 1–16.
- Schiochet Pinto, Luane, Daywes Pinheiro Neto, Anésio de Leles Ferreira Filho, and Elder Geraldo Domingues. 2020. “An Alternative Methodology for Analyzing the Risk and Sensitivity of the Economic Viability for Generating Electrical Energy with Biogas from the Anaerobic Bio-Digestion of Vinasse.” *Renewable Energy* 155: 1401–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.036>.
- Seman, S Z A, I Idris, A Abdullah, I K Shamsudin, and M R Othman. 2019. “Optimizing Purity and Recovery of Biogas Methane Enrichment Process in a Closed Landfill.” *Renewable Energy* 131: 1117–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.057>.
- Shi, Yan, Huaquan Yang, Shihua Zhou, Aiguo Wang, and Xingdong Lv. 2018. “Effect of Atmospheric Pressure on Performance of AEA and Air Entraining Concrete.” *Hindawi: Advances in Materials Science and Engineering* 2018 (6528412): 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/6528412>.
- Uddin, Waqar, B. Khan, Neelofar Shaukat, Muhammad Majid, G. Mujtaba, Arshad Mehmood, S. M. Ali, U. Younas, Muhammad Anwar, and Abdullah M. Almeshal. 2016. “Biogas Potential for Electric Power Generation in Pakistan: A Survey.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.083>.
- Ukpai, P A, and M N Nnabuchi. 2012. “Comparative Study of Biogas Production from Cow Dung, Cow Pea and Cassava Peeling Using 45 Litres Biogas Digester.” *Advances in Applied Science Research* 3 (3): 1864–69. [www.pelagiaresearchlibrary.com](http://www.pelagiaresearchlibrary.com).
- Unpaprom, Yuwalee, Tipsukhon Pimpimol, Kanda Whangchai, and Rameshprabu Ramaraj. 2021. “Sustainability Assessment of Water Hyacinth with Swine Dung for Biogas Production, Methane Enhancement, and Biofertilizer.” *Biomass Conversion and Biorefinery* 11 (3): 849–60. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00850-7>.
- Vijn, Sandra, Devan Paulus Compart, Nikki Dutta, Athanasios Foukis, Matthias Hess, Alexander N. Hristov, Kenneth F.



- Kalscheur, et al. 2020. "Key Considerations for the Use of Seaweed to Reduce Enteric Methane Emissions From Cattle." *Frontiers in Veterinary Science* 7 (December): 1–9. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>.
- Wainaina, Steven, Mukesh Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Hongyu Chen, Ekta Singh, Aman Kumar, B. Ravindran, et al. 2020. "Resource Recovery and Circular Economy from Organic Solid Waste Using Aerobic and Anaerobic Digestion Technologies." *Bioresource Technology* 301 (January): 122778. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>.
- Wang, Xiaojiao, Gaihe Yang, Yongzhong Feng, Guangxin Ren, and Xinhui Han. 2012. "Optimizing Feeding Composition and Carbon-Nitrogen Ratios for Improved Methane Yield during Anaerobic Co-Digestion of Dairy, Chicken Manure and Wheat Straw." *Bioresource Technology* 120: 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>.