

Biogas Production for a Pig Farm Heater through Optimized Codigestion of Manure and Household Waste

Jesus Sergio Pineda Salcedo¹ ; Estrella Marisol Romero Salazar² ;Wiliam Salvador Segura Rodriguez³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202019455@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201918027@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pciwseg@upc.edu.pe

Abstract– *The inadequate management of household waste and pig manure in the La Chutana area, district of San Bartolo, generates environmental impacts due to the emission of foul odors, proliferation of vectors, and contamination of soil and water, affecting nearby residents and local pig farms. The study aims to estimate biogas production through the anaerobic co-digestion of pig manure (PM) and household waste (HW) to generate heating for a pig farm. The characterization of household organic waste represented 52% of the total waste, and the pig farm showed a manure generation rate of $386,15 \pm 3,06$ kg/d. In the physicochemical composition, pig manure presented a pH of 7.23 and a C/N ratio of 10.56, while household waste showed a pH of 5.03 and a C/N ratio of 26.64. Biogas production was evaluated using three PM:HW mixing ratios (20:80, 50:50, and 80:20) at pH levels of 6, 7, and 8. Subsequently, Design Expert software was used to optimize production through a response surface model, determining that the optimal PM:HW ratio of 43:57 reached an average value of 1758,24 mL. The statistical optimum values were experimentally validated, obtaining 1800 mL after 12 days, a value close to the statistical prediction. By scaling up production with the available waste, $3,55 \text{ m}^3/\text{d}$ of biogas would be obtained, which, after removing moisture and possible contaminants (H_2S), could be used as fuel in a heater that would generate 27,70 kwh/d, supplying the thermal deficit of the pig farm.*

Keywords– *Biogas, pig manure, household waste, codigestion, heating.*

Producción de biogás para un calefactor porcino mediante codigestión optimizada de excretas y residuos domiciliarios

Jesus Sergio Pineda Salcedo¹ ; Estrella Marisol Romero Salazar² ;Wiliam Salvador Segura Rodriguez³

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202019455@upc.edu.pe

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201918027@upc.edu.pe

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, pciwseg@upc.edu.pe

Resumen – *La inadecuada gestión de residuos domiciliarios y excretas porcinas en la zona de La Chutana, distrito de San Bartolo, genera impactos ambientales debido a la emisión de malos olores, proliferación de vectores y contaminación del suelo y agua, perjudicando a los vecinos y criaderos locales. El estudio tiene como objetivo estimar la producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de excretas porcinas (EP) y residuos domiciliarios (RD) para generar calefacción en un criadero porcino. La caracterización de los residuos orgánicos domiciliarios representa el 52% del total y el criadero presenta una generación de $386,15 \pm 3,06$ kg/d de excretas. En la composición fisicoquímica, las excretas presentan pH de 7,23 y relación C/N de 10,56, mientras que los residuos domiciliarios presentan pH de 5,03 y C/N de 26,64. Se realizó la generación de biogás con tres proporciones de mezcla EP:RD (20:80, 50:50 y 80:20) a pH de 6, 7 y 8. Posteriormente, se empleó el software Design Expert para optimizar la producción mediante un modelo de superficie de respuesta, determinándose que la proporción óptima EP:RD de 43:57 alcanzó un valor promedio de 1758,24 ml. Los valores óptimos estadísticos se validaron experimentalmente, obteniéndose 1800 ml luego de 12 días, valor cercano a la proyección estadística. Al masificar la producción con los residuos disponibles se obtendrá $3,55 \text{ m}^3/\text{d}$ que, tras eliminar humedad y posibles contaminantes (H_2S) podrá ser empleado como combustible en un calefactor que generará $27,70 \text{ kwh}/\text{d}$ supliendo el déficit térmico del criadero.*

Palabras claves- *Biogás, excretas porcinas, residuos domiciliarios, codigestión, calefacción.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo se encuentra afrontando las consecuencias de los impactos ambientales generados por la inadecuada gestión de residuos. Panorama que aparentemente seguirá empeorando con el paso de los años [1]. Se estima que para el año 2050 la cantidad de residuos municipales aumentará en 3400 millones de toneladas, significando un aumento en el 70% con respecto a los niveles actuales [2]. Del mismo modo, entre los años 2000 - 2019 la actividad ganadera porcina ha tenido un crecimiento anual de 1,7%, llegando a tener en el año 2019 más de 1,5 billones de unidades a nivel mundial [3]. Respecto al Perú, en el año 2015 la población de cerdos llegó a tener 3,5 millones de unidades, siendo Lima la región con mayor población con el 14,3% [4]. En consecuencia, el incremento de la producción ganadera refleja un incremento

proporcional en la cantidad de excretas generadas por dicha actividad.

Al sur de la ciudad de Lima se encuentra el distrito de San Bartolo. Este lugar tiene problemas ambientales causados por la acumulación de residuos domiciliarios (RD) [5] y desmontes, los cuales generan olores desagradables y crea un entorno propicio para la proliferación de roedores. Asimismo, dentro del distrito, la zona de La Chutana enfrenta problemáticas adicionales debido a la presencia de criaderos porcino, donde el manejo de las excretas (EP) se realiza de forma inadecuada. Las EP son retiradas de las áreas de los cerdos y acumuladas en una parte del terreno, lo que provoca olores desagradables y fomenta la proliferación de moscas. Aunque estas son controladas ocasionalmente con cal y fumigación, estas medidas no resultan ser las más adecuadas ni sostenibles a largo plazo.



Fig. 1 Criadero la Chutana, San Bartolo

Algo resaltante de las excretas porcinas y residuos domiciliarios presentes en el lugar es el desperdicio de su potencial energético. Dichos residuos pueden ser procesados en un biodigestor para generar biogás, lo cual beneficiaría a los criaderos al proporcionar una fuente de energía renovable que puede ser empleado para generar calefacción a los lechones en su primera etapa de vida, reduciendo la mortalidad que se da por las bajas temperaturas, debido a que en la zona la temperatura oscila entre los 18°C – 24°C y la temperatura óptima para correcto desarrollo del lechón es de 28°C – 32°C . Además, este proceso contribuiría a reducir la acumulación de

residuos, así mismo, disminuiría las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En base a lo previamente presentado, el trabajo tiene como objetivo estimar la producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de excretas porcinas y residuos domiciliarios del criadero porcino mencionado. Para lo cual, se evaluarán las condiciones óptimas para generar biogás con respecto a los parámetros de pH y sustrato (excretas y residuos domiciliarios). A partir de ello, se realizó un análisis de superficie de respuesta para analizar a más detalle el impacto de los dos parámetros y sus interacciones durante la producción de biogás. En base a los resultados de producción de biogás se empleará un calefactor infrarrojo para moderar la temperatura del criadero. Además, se plantea la posibilidad de replicar el modelo en criaderos situados en zonas con cuyas condiciones similares a la región de Lima.

II. MÉTODOS

A. Caracterización fisicoquímica

En el estudio está trabajando con EP y RD. Los cuales fueron sometidos a un estudio de caracterización para conocer las características físicas de los sustratos. En el caso de los residuos domiciliarios se ha empleado Estudio de Caracterización de Residuos Domiciliarios del MINAM [6] por un periodo mínimo de 8 días para poder conocer qué tipo y cantidad de residuos son aptos para su aprovechamiento. El estudio consistió en determinar el tamaño de muestra del distrito para luego aplicar un muestreo aleatorio simple y determinar las muestras representativas que permitieron conocer la cantidad de residuos generados en la zona de la Chutana en San Bartolo.

En el caso de las excretas porcinas se empleó una fórmula para determinar la cantidad excretas que genera un cerdo en base a tiempo de estabulación (T_E), el peso del cerdo (P_V) y el porcentaje de generación de excretas a partir del peso (E_H) [7] para poder estimar la dinámica anual de la generación de excretas en el criadero.

$$C_{TE} = P_V \times E_H \times \frac{T_E}{24} \quad (1)$$

Por otro lado, para conocer la composición química de los sustratos, se tomó una muestra representativa de 1 kg cada sustrato para conocer su nivel de pH, relación C/N, material volátil, humedad (%), carbono, nitrógeno, ceniza. Estos análisis fueron realizados en la Universidad Agraria de la Molina.

B. Determinación de la mezcla optima

Se propuso trabajar con tres proporciones de mezcla EP y RD, con alteración en los niveles de pH [8], tal como se puede ver en la tabla I. La metodología empleada fue el ensayo backstage que permitió conocer la interacción entre el nivel de pH y la proporción de la mezcla EP: RD, además se empleó un diseño factorial de $3^2 = 9$ para permitir la interacción total entre las variables. Para la preparación de las mezclas, se diluyeron las EP y los RD orgánicos en agua, según una fórmula

de dilución [9]. El proceso experimental se realizó utilizando matraces de 3000 ml, en los cuales se empleó un volumen de 1000 ml, dejando el volumen restante para la acumulación del biogás producido (Fig.2). Para lo cual los RD fueron cortados en pedazos pequeños y posteriormente licuados con un porcentaje mínimo de agua, para volver más fácil la mezcla de RD con EP y facilitar la digestión bacteriana. Mientras que las EP no fueron alterada de ninguna manera antes de su mezcla.

Cabe mencionar que durante la producción del inoculo no se añadió ningún aditivo que permita acelerar o potenciar el proceso de codigestión anaerobia, únicamente se empleó el proceso microbiológico natural que se suscitó a partir de la mezcla.

TABLA I
PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS PARA EL ENSAYO BACKSTAGE

Relación EP: RD	pH	Descripción
20:80	6	100 g EP: 400 g RD + 447 ml agua
20:80	7	100 g EP: 400 g RD + 447 ml agua
20:80	8	100 g EP: 400 g RD + 447 ml agua
50:50	6	250 g EP: 250 g RD + 529 ml agua
50:50	7	250 g EP: 250 g RD + 529 ml agua
50:50	8	250 g EP: 250 g RD + 529 ml agua
80:20	6	400 g EP: 100 g RD + 447 ml agua
80:20	7	400 g EP: 100 g RD + 447 ml agua
80:20	8	400 g EP: 100 g RD + 447 ml agua

En los matraces se midió previamente el pH para asegurar que se encontraran dentro de los niveles correspondientes. Posteriormente, se realizaron mediciones diarias de la producción de biogás mediante el método de desplazamiento de agua [8], durante un periodo aproximado de 15 días.



Fig. 2 Medición de volumen por desplazamiento de agua

En base a la producción de biogás registrado se empleó el software Desing Expert para generar una de superficie de respuesta siguiendo un modelo cuadrático, para determinar la mezcla optima en función de estos dos factores.

$$V = A + B + AB + A^2 + B^2 \quad (2)$$

Con los valores de mezclas optimas obtenidas por superficie de respuesta, se optó por realizar un segundo ensayo de respaldo

(backstage), esto con el objetivo de corroborar experimentalmente estos valores.

C. Masificación de la producción de biogás

Dicho experimento conto con una carga diaria de sólidos volátiles (SV) y un pH controlado de 6,5. A partir de los datos obtenidos, se calculó un ratio de escalamiento que permitió proyectar la producción de biogás a pequeña escala hacia un biodigestor de mayores proporciones con una capacidad de 748,2 kg de SV. Este ratio sirvió para estimar el volumen diario de biogás (en litros), asumiendo un comportamiento proporcional entre la escala experimental y la escala real del criadero.

Posteriormente, se procedió a determinar el déficit térmico del criadero. Para ello, se aplicó la fórmula de transferencia de calor [10]. En la cual se obtuvo la tasa de transferencia de calor (Q) mediante el coeficiente de transferencia de calor (U), el área de los lechones (A) y la diferencia entre la temperatura ambiente y optima (ΔT).

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (3)$$

A partir de la temperatura promedio del criadero junto a la temperatura óptima para los lechones, así como el área donde se encuentran y el coeficiente de transferencia de calor. Obteniéndose así la cantidad de energía requerida para compensar dicho déficit. Y a partir de esos resultados se podrá elegir un calefactor apropiado para las necesidades identificada en el criadero. Sin embargo, el biogás aun no puede ser utilizado para la generación de calefacción, debido a que contiene humedad y contaminantes con el sulfuro de hidrogeno (H_2S), lo que es perjudicial para el equipo empleado, para prevenir problemas a futuro se propone el uso de una trampa de humedad para la remoción de vapor de agua la cual consiste en una tubería en forma de U que se encargaran de condensar la humedad, evitando así su paso. Por otro lado, para la eliminación de (H_2S) se propone el uso de filtros con viruta de hierro (FE_2O_3) para la purificación del biogás y poder dejarlo en condiciones optimas para su uso directo en la generación de calefacción [11].

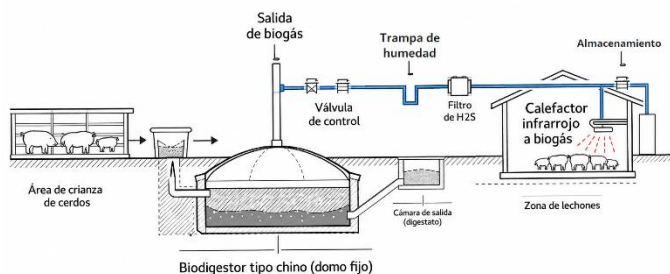


Fig. 3 Flujograma de la producción de biogás

III. RESULTADOS

A. Composición fisicoquímica

Los resultados de la composición de los residuos domiciliarios fueron de 52,66%, lo que representa un total de

1212 kg acumulados durante ocho días. En la tabla II se observa la información recolectada de los residuos domiciliarios de la zona de la Chutana.

TABLA II
CARACTERIZACION DE RESIDUOS DOMICILIARIOS-RD

Tipo de residuos	Total kg	Porcentaje %
1. Residuos aprovechables	848,21	69,98%
1.1. Residuos orgánicos	638,37	52,66%
1.2. Residuos Inorgánicos	209,84	17,31%
2. Residuos no aprovechables	363,93	30,02%
Total	1212,14	100,00%

En la tabla III se observan los resultados del análisis fisicoquímico de los residuos domiciliarios de la zona de la Chutana, hechos en la Universidad Agraria La Molina.

TABLA III
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS- RD

Parámetros	Residuos domiciliarios
Humedad (%)	73.31 %
Ceniza (%)	13.70 %
Material volátil (%)	86.30 %
Carbono (%)	50.00 %
Nitrógeno (%)	1.86 %
Nivel de pH	5.03
Relación C/N	26.64

Por otro lado, las excretas porcinas del criadero presentaron un promedio de generación de $386,15 \pm 3,06$ kg/d. En la tabla IV se observa la dinámica de generación de excretas del criadero de la Chutana. En cuanto a la composición química, los resultados obtenidos se detallan en la Tabla V.

TABLA IV
EXCRETAS PRODUCIDAS-EP

Tipos	Cantidad de excretas (kg/día)
Lechón	$5,00 \pm 1,00$
Destete	0
Desarrollo	$23,88 \pm 0,60$
Engorda	$167,97 \pm 2,64$
Primeriza	0
Reproductor	$189,30 \pm 1,02$
Total	$386,15 \pm 3,06$

TABLA V
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS- EP

Parámetros	Excretas porcinas
Humedad (%)	82.14 %
Ceniza (%)	23.70 %
Material volátil (%)	76.30 %
Carbono (%)	44.30 %
Nitrógeno (%)	4.20 %
Nivel de pH	7.23
Relación C/N	10.56

En la figura 4, las mezclas de proporción 20 % - 80 % alcanzaron su punto máximo en días diferentes, la mezcla con pH llegó a su punto máximo en el día 7 con 300 ml, similar es el caso de la mezcla con pH 8 que también llegó a su punto máximo en el día 7 pero apenas registró 100 ml de producción

y la mezcla de pH 6 llegó a su punto máximo el día 9 con 250 ml.

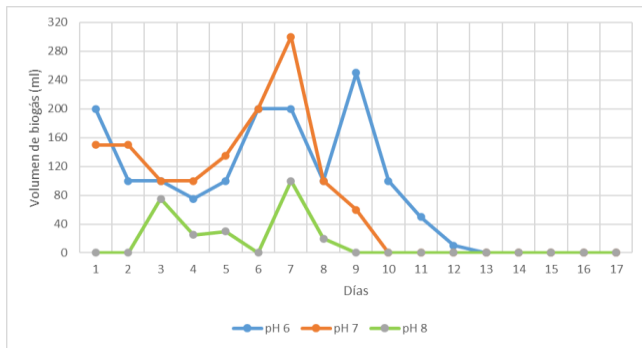


Fig. 4 Producción de biogás 20% - 80% (ml/día) - Escala laboratorio

En la figura 5, las mezclas de proporciones 50 % - 50 % llegaron de manera temprana a sus picos de producción, las mezclas de pH 6 y 7 las primeras en llegar a sus picos en el día 3 con volúmenes de 470 ml y 500 ml respectivamente. Mientras que la mezcla con pH 8 llegó a su punto máximo en el día 4 con una producción de 50 ml.

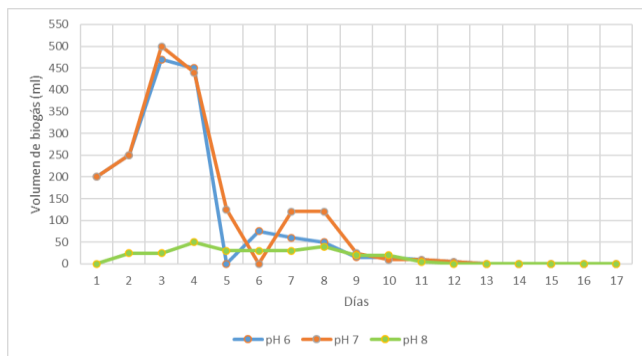


Fig. 5 Producción de biogás 50% - 50% (ml/día) - Escala laboratorio

En la figura 6, las mezclas fueron las de 80 % - 20 %, las cuales a diferencia de las anteriores mezclas llegaron a sus puntos máximos en días diferentes. La mezcla con pH 7 la primera en alcanzar su punto máximo en el día 4 con 275 ml, mientras que la mezcla de pH 6 fue la segunda en llegar a su punto máximo en el día 6 con una producción de 370 ml y la mezcla de pH 8 llegó a su punto máximo en el día 7 con 75 ml.

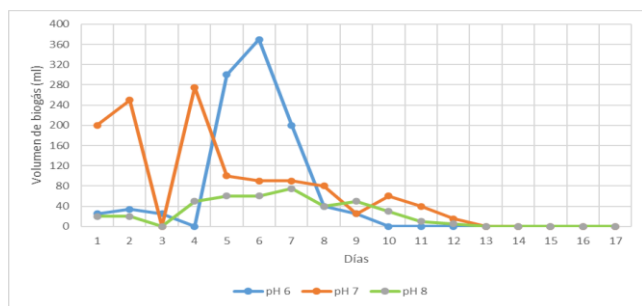


Fig. 6 Producción de biogás 80% - 20% (ml/día) - Escala laboratorio

B. Determinación de la mezcla optima

En la tabla VI se reportan los datos de volumen acumulado de biogás, obtenidos del primer ensayo backstage, durante 12 días.

TABLA VI
REGISTRO DE EXPERIMENTOS

Numero de experimento	A	B	% EP	pH	V (ml)
1	-1	-1	50	6	1600
2	-1	0	50	7	1805
3	-1	1	50	8	275
4	0	-1	80	6	1019
5	0	0	80	7	1225
6	0	1	80	8	420
7	1	-1	20	6	1485
8	1	0	20	7	1295
9	1	1	20	8	250

En la figura 7 se muestra la gráfica de superficie de respuesta del volumen de biogás producido (V ml) en función del porcentaje de excretas porcinas (A) y el nivel de pH (B). empleando el software Design Expert. Se observa que el volumen de biogás aumenta conforme se incrementa el porcentaje de excretas y se mantiene un nivel de pH cercano a 7, evidenciando una curvatura ascendente en la superficie.

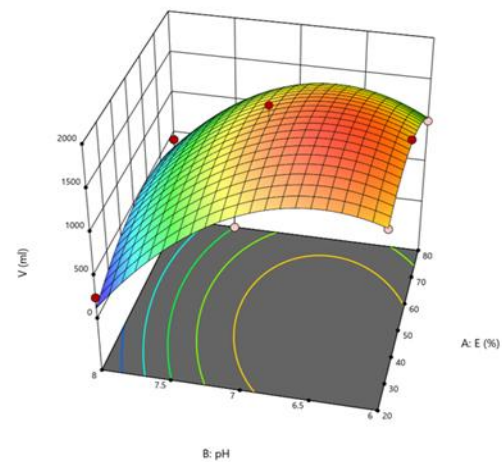


Fig. 7 Superficie de respuesta

Mediante la gráfica de superficie de respuesta se obtiene la ecuación (4), la cual explica la correlación entre los factores excretas porcinas (A) y pH (B) en relación con la producción de biogás (V).

$$V = +1626.78 - 61.00 \times A - 526.50 \times B + 159.00 \times AB - 277.67 \times A^2 - 600.17 \times B^2 \quad (4)$$

Con base en la ecuación (4) derivada del gráfico de superficie de respuesta, se determinaron las condiciones óptimas que debe cumplir el sustrato para maximizar la producción de biogás, con un pH de 6.52 y A: E 42.67 el volumen de biogás producido será de 1758.24ml, como se observa en la figura 8.

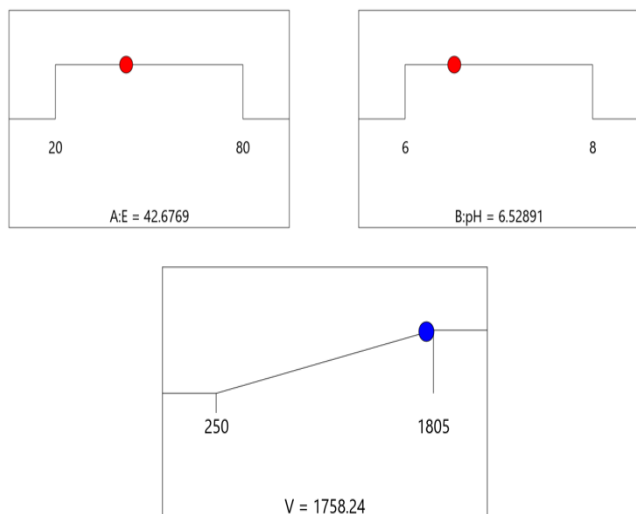


Fig. 8 Solución - Mezcla optima

En el modelo cuadrático se observa que el nivel de pH es la variable que más influye en la producción de biogás, al presentar un valor de p menor a 0,05. Asimismo, la interacción entre las variables excretas y pH no resulta significativa. Por lo tanto, durante el proceso de codigestión, la variable a priorizar es el nivel de pH.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2.661E+06	5	5.323E+05	12.38	0.0324	significant
A-E	22326.00	1	22326.00	0.5193	0.5232	
B-pH	1.663E+06	1	1.663E+06	38.68	0.0084	
AB	1.011E+05	1	1.011E+05	2.35	0.2227	
A ²	1.542E+05	1	1.542E+05	3.59	0.1546	
B ²	7.204E+05	1	7.204E+05	16.76	0.0264	
Residual	1.290E+05	3	42994.37			
Cor Total	2.790E+06	8				

Fig. 9 Modelo cuadrático por ANOVA

Se observa que el modelo de R^2 y R^2 ajustado son cercanos a 1, dando validez al modelo.

Std. Dev.	207.35	R²		0.9538
Mean	1041.56	Adjusted R²		0.8767
C.V. %	19.91	Predicted R²		0.5582
		Adeq Precision		8.8737

Fig. 10 Ajuste estadístico

Como segundo ensayo backstage, se obtuvieron volúmenes de biogás que fueron registrados mediante mediciones diarias por desplazamiento de agua. Las figuras 11, 12 y 13 muestran el volumen acumulado por 12 días.

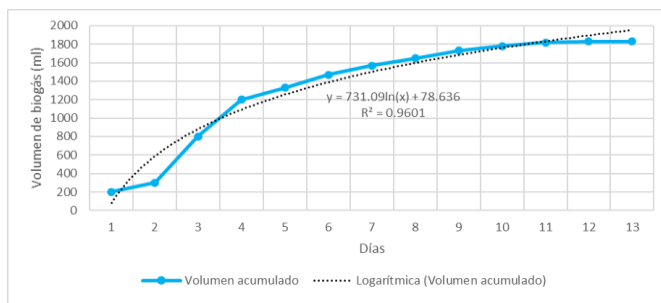


Fig. 11 Producción acumulada de biogás 43% - 57% (1830ml) primera repetición - Escala laboratorio

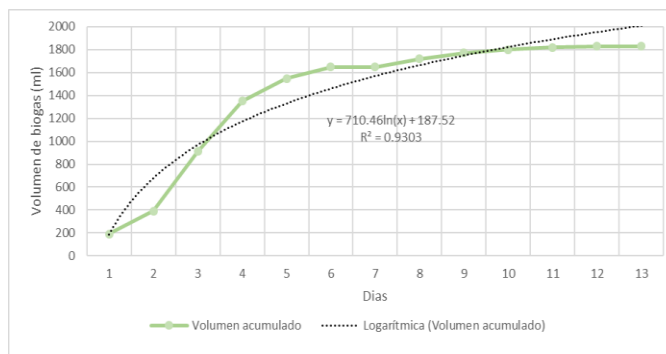


Fig. 12 Producción acumulada de biogás 43% - 57% (1830 ml) segunda repetición - Escala laboratorio

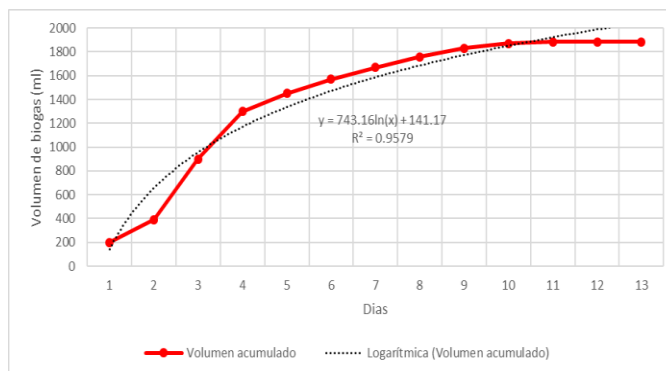


Fig. 13 Producción acumulada de biogás 43% - 57% (1885 ml) tercera repetición - Escala laboratorio

La tabla VII muestra el volumen Experimental medio de 1848ml en el segundo ensayo backstage mostrando una diferencia entre 3.3% a 6.9% con respecto al Volumen predicho por optimización con el Design Expert

TABLA VII
COMPARACION DE VOLUMENES OPTIMOS

Numero de experimento	V Experimental (ml)	V Predicho (ml)
1	1830	1758.24
2	1830	
3	1885	
Promedio	1848.33	
Std. Dev	31.75	

C. Masificación de la producción de biogás

Al emplear el total de las EP generadas diariamente en el criadero, que representan el 47% de la mezcla, y combinarlas con RD (53%) y una proporción adecuada de agua, se procesarán aproximadamente 1883 L/d de sustrato, lo cual permitirá generar un volumen estimado de $3,55\text{m}^3/\text{d}$ de biogás con concentración aproximada de 45% de metano (CH_4). En base a la producción promedio de biogás, se seleccionó un calefactor infrarrojo capaz de proporcionar de manera continua 3 kW de energía térmica, mediante el consumo de $2,59\text{m}^3$ de biogás durante un periodo de 8 horas.

Cabe resaltar que esta cantidad de biogás utilizada no representa el total producido diariamente, por lo tanto, el tiempo de funcionamiento del calefactor podría prolongarse. Además, en caso de que el biogás no sea tan necesario en los meses de verano se optara por almacenar la producción excedente para su posterior uso en cocción de alimentos.

IV. DISCUSIÓN

El estudio de caracterización de RD mostró que el 52% corresponde a residuos orgánicos, resultado similar al obtenido en el estudio realizado por la Municipalidad de San Bartolo en el año 2020, donde estos también representan el mayor porcentaje (51%) de la composición total [12]. Por otro lado, los análisis de la composición química de los residuos en la zona de La Chutana revelaron un pH de 5,03 y una relación C/N de 26,64, valores que difieren de los obtenidos en la ciudad de Salem, India, donde se registraron un pH de 7,5 y una relación C/N de 24,32. La diferencia en el porcentaje de residuos orgánicos puede estar relacionada con la cantidad total de residuos caracterizados, mientras que las variaciones en la composición química se deben principalmente al tipo de residuos presentes en las muestras y al estado en que se encuentran al momento de la toma, influenciado por las condiciones ambientales y el tiempo que hayan permanecido expuestos.

La caracterización de las EP del criadero ubicado en La Chutana determinó una generación diaria de 386,15 kg/d, con un pH de 7,23 y una relación C/N de 10,56. Al comparar estos resultados con los obtenidos en un estudio realizado en criaderos de la zona de Saracoto-Alto [13], donde se registró un pH de 7,79 y una relación C/N de 18,14, se observa una diferencia significativa. Esta variación se atribuye principalmente al tipo de alimentación suministrada a los cerdos, ya que en algunos lugares se opta por emplear el alimento balanceado mientras que otros emplean residuos alimentarios. De igual manera con las categorías productivas presentes en cada criadero.

El primer ensayo backstage dio como resultado que el volumen de producción de biogás óptimo (1758.24ml) fue para la mezcla EP 42.67: RD 57.33 (C/N = 18,8) y con pH 6.5, esto difiere ligeramente estudios que mencionan que las mezclas de proporciones 50:50 son una forma estándar ya que el residuo adicional a las EP actuará como estabilizador y mejorará el

proceso de producción de biogás, al regular el nivel de pH y la relación C/N [14]. El segundo ensayo Backstage corrobora la predicción del volumen de producción óptima de biogás.

Un factor que llega a influir directamente en la producción de biogás es la temperatura. Controlar la temperatura facilita la degradación de la materia, ya que las altas temperaturas favorecen significativamente el proceso de digestión anaerobia [15]. Para el ensayo backstage se optó por llevar a cabo el experimento bajo las condiciones de temperatura ambiente del lugar (criadero porcino), con el fin de evaluar si se presentaban dificultades durante el proceso de digestión anaerobia. Este factor debería ser tomado en cuenta porque durante el día se registran altas temperaturas, mientras que por la noche estas descienden considerablemente, un nivel de temperatura demasiado bajo perjudicaría en gran medida la producción de biogás al volver imposible el desarrollo de las comunidades bacterias y evitando la correcta degradación del sustrato con posible generación de contaminantes [8]. En el contexto actual, la temperatura de la Chutana es considerablemente variable entre las horas y en el cambio de las estaciones. Sin embargo, durante los ensayos realizados no se registraron repercusiones negativas por la temperatura de las horas nocturnas. Por lo tanto, aunque el presente caso la variación de la temperatura no represento ningún problema, sigue siendo una variable directamente significativa para el proceso de producción conforme aumente la escala, así que es necesario tener un método para mantener el biodigestor dentro del rango de temperatura necesario para la ejecución del proceso. Como el modelo chino de carga continua que mantiene su temperatura constante al estar semi sepultado y teniendo únicamente expuestos los conductos de entrada y salida.

El gráfico de superficie de respuesta permitió analizar la dinámica de producción de biogás en función de la proporción de excretas y el nivel de pH, lo que facilitó la identificación de la mezcla óptima y de las condiciones necesarias para llevar a cabo adecuadamente el proceso de digestión anaerobia. Para el análisis estadístico se empleó un modelo de regresión cuadrática, el cual describió correctamente la variabilidad de los datos, obteniéndose un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0,88, lo que indica un buen nivel de ajuste del modelo.

En contraste con otro estudio [16], cuyo gráfico de superficie se centró en encontrar la mezcla óptima utilizando dos tipos de excretas animales y residuos alimentarios, sin considerar las condiciones que debe cumplir el sustrato durante la digestión, el presente análisis priorizó la inclusión de variables críticas como el pH. Aquel estudio aplicó una regresión escalonada hacia atrás debido a la baja correlación entre variables, lo que permitió eliminar aquellas menos significativas. Si bien este enfoque permitió definir proporciones óptimas entre sustratos, el modelo obtuvo un R^2 de 0,98, reflejando un mayor ajuste estadístico, aunque sin incorporar factores operativos clave como la temperatura o el pH.

Por lo tanto, aunque una mezcla pueda parecer ideal desde el punto de vista de la composición, su eficacia real no está garantizada si no se consideran variables operativas fundamentales que influyen directamente en el rendimiento del proceso de digestión anaerobia. Por lo tanto, se deben realizar experimentos y ensayos para poder conocer el potencial de producción de la mezcla, además de que se debe tomar en cuenta que la dinámica de producción puede variar si es a pequeña o a gran escala tanto en la cantidad de biogás producida y en el tiempo requerido para su producción [17].

Al analizar la producción de biogás a escala criadero en la Chutana ($3,55 \text{ m}^3/\text{d}$) a partir de una biomasa de $1883,65 \text{ kg/d}$ (Excretas + residuos + agua), se identificó similitud con un estudio realizado en la granja porcina China Desheng Agriculture and Animal Husbandry Development [18] donde se estudió el rendimiento de un biodigestor de película negra para tratar tres cargas de 30 m^3 de excretas porcinas con tres proporciones de agua dando como resultado producciones de biogás de 15 m^3 , $7,5 \text{ m}^3$ y 5 m^3 .

En la actualidad el criadero de la Chutana no posee ninguna fuente de calefacción que puede mantener la temperatura óptima para la cría de lechones, por dicho motivo se propone usar un calentador infrarrojo M5 con capacidad de 3 kW que proporcionara la energía suficiente como para mantener a los lechones dentro del rango de la temperatura óptima ($32,5^\circ\text{C}$) [19] durante las horas de menor temperatura. Sin embargo, para garantizar el correcto funcionamiento y prevenir la degradación del equipo es necesario eliminar el porcentaje de H_2S presente en el biogás. Para ello se propuso el uso de virutas de hierro como filtro para la purificación. A pesar de la eficiencia del método existen alternativas de pretratamiento para las virutas con el objetivo de eliminar impurezas adicionales y mejorar la eliminación H_2S [20].

El uso de calefactores y el uso directo del biogás no son las únicas maneras de generar calefacción para un criadero. Recientemente la universidad nacional de Chiayi de Taiwán [21] desarrolló un sistema de calefacción de agua mediante el uso de biogás y un sistema de ventilación para granjas, el sistema calienta aproximadamente $0,7 \text{ m}^3$ de agua cuyo vapor y calor son enviados a las zonas requeridas por un sistema de ventilación. La principal diferencia es que el biogás fue empleado para calentar y distribuir vapor de agua que se encargará de mantener la temperatura en 28°C en comparación al calefactor que calentará el aire de manera directa, además de utilizar filtros para evitar emisiones perjudiciales mientras que el sistema taiwanés tendrá que hacer circular el vapor de agua generado y enviarlo a la atmosfera. Por otro lado, no es posible aplicar el modelo taiwanés debido a la ausencia de un suministro continuo del recurso hídrico en la zona de la Chutana.

V. CONCLUSIÓN

El presente estudio evidenció el potencial de valorización energética de los residuos sólidos orgánicos y las excretas porcinas generadas en la zona de La Chutana. A través de la

caracterización fisicoquímica y el análisis estadístico de los parámetros críticos, se logró identificar una mezcla óptima 43% EP con 57% RD con pH 6.5 que permitió maximizar la producción de biogás bajo condiciones controladas, sin embargo, en otros estudios se optó por tener proporciones de 50:50 en el sustrato utilizado con el propósito de estimular de mejor manera la dinámica de la bacterias metanogénicas al momento de degradar y consumir el sustrato para producir biogás [13] pero no es una condición que se pueda definir para todos los casos. Asimismo, el modelo de regresión cuadrática aplicado presentó un buen ajuste (R^2 ajustado = 0,88), validando la influencia de los factores seleccionados en la generación de biogás.

A escala criadero, la proyección de producción energética alcanzó los $3,55 \text{ m}^3/\text{d}$ de biogás, lo cual permitiría cubrir el déficit térmico del módulo de maternidad mediante el uso de calefactores infrarrojos. Esta propuesta resulta viable tanto técnica como ambientalmente, en tanto contribuye a reducir emisiones, valorizar residuos y disminuir el uso de combustibles fósiles.

Finalmente, el proyecto reconoce las limitaciones propias del contexto local, como la variabilidad térmica ambiental o la escasez de agua, y plantea soluciones realistas adaptadas a dichas condiciones. Este enfoque permite proyectar su replicabilidad en otros criaderos de pequeña escala con condiciones similares a la región de Lima.

AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), a los profesores del curso de Proyectos de Investigación Ambiental por impulsar el desarrollo de este trabajo.

REFERENCES

- [1] C. A. Teixeira and M. Guerra, "Municipal Solid Waste Addressing Environmental Concerns," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 1235, Feb. 2024, doi: 10.3390/su16031235.
- [2] Banco Mundial (BM), *Los desechos: Un Análisis Actualizado del Futuro de la Gestión de los Desechos Sólidos*, 2018. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>.
- [3] Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), *Panorama y Perspectivas de la Producción de Carne de Cerdo en el Perú*, 2020. [Online]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/566516/Panorama_y_pers_p_produc_carne_cerdo.pdf.
- [4] Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), *Plan Nacional de Desarrollo Ganadero*, 2017. [Online]. Available: <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/plan-nacional-ganadero.pdf>.
- [5] M. Verastegui, "Estudio de Residuos Sólidos de San Bartolo", Municipalidad de San Bartolo, 21 de Mayo del 2018.
- [6] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Guía para la Caracterización de Residuos Sólidos Municipales*, 2019. [Online]. Available: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/per186738anx.pdf>.
- [7] Y. Ramos, J. Boseh, R. Arias, A. Santana, and D. Gutierrez, *Dimensionamiento de un Biodigestor para el Tratamiento de Excretas de Cerdos*, 2021. [Online]. Available: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/821>.

- [8] A. I. Al-Zoubi, T. M. Alkhamis, and H. A. Alzoubi, "Optimized Biogas Production from Poultry Manure with Respect to pH, C/N, and Temperature," *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102040, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102040.
- [9] Bobadilla, E. (2014). Determinación del Porcentaje de Humedad. <https://es.slideshare.net/slideshow/determinacin-del-porcentaje-de-humedad/40901102>
- [10] M. Loureiro, *Fórmulas de Termodinámica*. [Online]. Available: <http://www.marioloureiro.net/ciencia/termodinam/Formulas.pdf>.
- [11] S. Torres, M. Paucar and N. Pampa, *Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para reuso energético* [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000100018
- [12] Municipalidad de San Bartolo, "PLAN DISTRITAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS", 2020.
- [13] J. Baras and E. Rosales, *Excretas Porcinas para la Producción de Biofertilizante Mediante Digestión Anaeróbica, en la localidad Saracoto Alto, Lurigancha, Chosica – 2021*, 2021. [Online]. Available: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/71995/Baras_HJZ-Rosales_REM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [14] X. Xue, X. Li, and N. Shimizu, "Synthesis Evaluation on Thermophilic Anaerobic Co-digestion of Tomato Plant Residue with Cattle Manure and Food Waste," *Resources, Environment and Sustainability*, vol. 13, p. 100119, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.resenv.2023.100119.
- [15] Y. Park, J. Khim, and J. D. Kim, "Application of a Full-Scale Horizontal Anaerobic Digester for the Co-Digestion of Pig Manure, Food Waste, Excretion, and Thickened Sewage Sludge," *Processes*, vol. 11, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/pr11041294.
- [16] G. Baek, D. Kim, J. Kim, H. Kim, and C. Lee, "Treatment of Cattle Manure by Anaerobic Co-digestion with Food Waste and Pig Manure: Methane Yield and Synergistic Effect," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 13, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/ijerph17134737.
- [17] I. de P. Sousa, A. P. Rosa, A. C. Borges, and N. dos S. Renato, "Energy Potential of Biogas from Pig Farms in the State of Minas Gerais, Brazil," *Engenharia Agrícola*, vol. 40, no. 3, pp. 396–404, 2020, doi: 10.1590/
- [18] X. Guo, X. Cui, H. Li, and B. Xiong, "Purifying Effect of Biochar Zeolite Constructed Wetlands on Arsenic Containing Biogas Slurry in Large Scale Pig Farms," *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, Art. no. 123579, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123579.
- [19] Z. Jarosz, M. Kaplan, K. Klimek, B. Dybek, M. Herkowiak, G. Wałowski, *An Assessment of the Development of a Mobile Agricultural Biogas Plant in the Context of a Cogeneration System*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app132212447>.
- [20] J. Jiraporn, P. Pongyeela, N. Chairerk and J. Chungsiriporn, *H₂S Removal from Biogas using Steel Wool (Fe₂O₃) Adsorption Combined with Water Absorption: Experimental and Modelling via RSM*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12982/CMJS.2024.027>
- [21] C.-C. Lien, C.-H. Ting, and J.-H. Mei, "Piglets Comfort with Hot Water by Biogas Combustion Under Controllable Ventilation," *Advances in Technology Innovation*, vol. 3, no. 2, pp. 86–93, 2018. [Online]. Available: <https://ojs.imeti.org/index.php/AITI/article/view/813>.