

Biochemical Methane Potential of Slaughterhouse Organic Waste Co-Digestion: A case study in Arequipa-Peru using Augmented Simplex-Centroid Method

Abstract– The meat industry has been growing steadily and significantly on a global scale over the past few decades. This boom has intensified the challenges associated with waste management, particularly due to the generation of organic waste from slaughterhouses, which poses an environmental risk when not properly managed. In this context, the objective of this study was to analyze biogas production through the anaerobic co-digestion of blood (SA), manure (ES), and ruminal content (CR) at a slaughterhouse in the Arequipa region of Peru. To this end, biochemical methane potential (BMP) tests were conducted using an augmented simplex-centroid mixture experimental design. The various substrates were physically and chemically characterized and subjected to triplicate tests under controlled conditions (35 °C), applying the GD BMP method to quantify the biogas produced every three days. Statistical analysis (ANOVA) revealed significant differences among the formulations ($p < 0.05$). The mixture composed of 66.67% SA – 16.67% ES – 16.67% CR achieved the highest yield among the formulations (704.34 ml biogas/g DM), while the monodigestion of blood presented the highest average value (725.60 ml biogas/g DM). The intermediate values showed moderate yields (339–472 ml biogas/g DM), while treatments dominated by ES and CR recorded lower values, with pure manure standing out at 153.8 ml biogas/g DM. The results demonstrated the positive effect of blood as a highly biodegradable substrate and the limitations of fibrous materials, confirming the relevance of co-digestion as a recovery solution for optimizing biogas production from organic waste generated in slaughterhouses.

Keywords-- Biogas; Co-digestion; Biochemical methane potential; Slaughterhouse waste; Simplex-centroid design.

Potencial bioquímico de metano de la codigestión de residuos orgánicos en mataderos: un estudio de caso en Arequipa - Perú utilizando el método del simplex-centroide aumentado

Ana Contreras Huaripaucar¹; Sofia Mendoza Guerra²; Jose-Carlos Lama³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u202120710@upc.edu.pe, u20211c936@upc.edu.pe, pcigilam@upc.edu.pe

Resumen – La industria cárnica viene creciendo de manera sostenida y significativa en las últimas décadas a escala global. Este auge ha intensificado los retos asociados a la gestión de residuos, especialmente por la generación de desechos orgánicos procedentes de mataderos, los cuales representan un riesgo ambiental cuando no son manejados adecuadamente. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar la producción de biogás mediante la codigestión anaerobia de sangre (SA), estiércol (ES) y contenido ruminal (CR) en un matadero de la región Arequipa, Perú. Para ello se realizó ensayos de potencial bioquímico de metano (BMP) utilizando un diseño experimental de mezclas tipo simplex-centroide aumentado. Los diversos sustratos fueron caracterizados fisicoquímicamente y sometidos a ensayos por triplicado bajo condiciones controladas (35 °C), aplicando el método GD BMP para la cuantificación del biogás producido cada tres días. El análisis estadístico (ANOVA) evidenció diferencias significativas entre las formulaciones ($p < 0,05$). La mezcla compuesta por 66,67% SA – 16,67% ES – 16,67% CR alcanzó el mayor rendimiento entre las formulaciones (con 704,34 ml biogás/g SV), mientras que la monodigestión de sangre presentó el valor promedio más alto (725,60 ml biogás/g SV). Los valores intermedios mostraron rendimientos moderados (339-472 ml biogás/g SV), mientras que los tratamientos con predominio de ES y CR registraron valores más bajos, destacando el de estiércol puro con 153,8 ml biogás/g SV. Los resultados evidenciaron el efecto positivo de la sangre como sustrato altamente biodegradable y la limitación de los materiales fibrosos, confirmando la relevancia de la codigestión como solución de valorización en la optimización la producción de biogás de residuos orgánicos generados en mataderos.

Palabras clave-- Biogás; Codigestión; Potencial bioquímico de metano; Residuos de matadero; Diseño simplex-centroide.

I. INTRODUCTION

El consumo de carne aumentó en las últimas seis décadas a nivel mundial [1], concentrando el continente americano el mayor consumo, con un 43,3% de carne de pollo y 48,8% vacuno [2]. En 2020, a nivel mundial, se sacrificaron 70 mil millones de animales, con una producción de 252,6 millones de toneladas [3], mientras en 2023 la producción alcanzó los 354Mt, estimándose que en 2030 se alcanzará los 373 Mt, un incremento del 13% y se proyecta que en 2033 llegará a 388 millones, con aumentos de 16% en aves y ovino, 11% vacuno y 8% en carne de cerdo respecto al promedio de 2021-2023 [4].

El aumento en la producción cárnica conlleva un incremento en la generación de residuos. Los mataderos generan una proporción significativa de residuos como sangre (SA), estiércol (ES), contenido ruminal (CR), entre otros [5][6], que, sin un manejo adecuado, generan impactos ambientales negativos [3][7]. Respecto al peso del animal sacrificado en bovinos, este representa el 27,5% del peso vivo y en cerdos el 4% [8]. En cuanto a la sangre, una vaca de 600 kg produce hasta 18 l de sangre, un ovino de 45 kg genera 3 l y un porcino de 110 kg entre 4 y 5 litros [1]. Por su parte, los efluentes de mataderos presentan altos niveles de DBO, DQO [9] y contenido orgánico [5][6]. Esto representa un riesgo ambiental y sanitario, relacionado a la proliferación de enfermedades zoonóticas [10].

En Perú, el 82% de los 236 camales municipales oficiales opera sin instrumento de gestión ambiental (IGA), registrándose más de 400 incumplimientos en gestión de residuos [11] en departamentos tan distintos como Cajamarca, Ica, Loreto, Pasco o Piura [12]. Dicha problemática se evidencia en casos documentados, como el camal municipal Tayacaja, cuyos efluentes superan el ECA categoría 4 y son vertidos al Río Upa Mayo [13], el de Huánuco que genera aproximadamente 972 t/año de residuos [14] o el matadero de Punchana, en Iquitos, que generó 61 466 l/año de sangre [15].

Los efectos de dicha problemática impactan directamente a las comunidades cercanas mediante la emisión de olores y proliferación de vectores [16], [17]. Los vectores son responsables del 17% de enfermedades infecciosas [18] y la exposición a malos olores provoca dolores de cabeza, náuseas y estrés [19], deteriorando la calidad de vida [20]. Esta situación persiste debido a limitaciones estructurales: solo el 11% de los mataderos tiene instalaciones adecuadas para gestión de residuos [21], las municipalidades enfrentan limitaciones técnicas [22] [11] [23], sumado a la falta de interés de autoridades [24] y de trabajo interinstitucional articulado.

El Camal Metropolitano La Colina que opera desde 1993 sin IGA [25] [22] [26] supera su capacidad autorizada con el beneficio de 716 vacunos, 2082 porcinos y 134 ovinos [25]. Dispone sus efluentes en 7 pozas sin impermeabilizar [25], [27]

y cuenta con un pozo de sedimentación de 30% de suelo natural [25]. Por su parte, los efluentes superan los coliformes en 424 999 900% (1700000000 NMP/100 ml), DBO en 8 160% (4130 mg/l), DQO en 3 333% (8582,9 mg/l), SST en 3 033% (1566,7 mg/l), aceites y grasas en 1 846% (194,6 mg/l), fósforo total en 2 921% (8582960,4 mg/l), Nitrógeno total en 79 552% (805,5 mg/l) [25] y emite olores afectando a la población cercana [24]. Su gestión consta de la disposición de residuos en pozos, incineración, recolección de bazofia, y no cuenta con un mecanismo de recolección de estiércol [11], [22].

Una alternativa tecnológica competitiva para la valorización de estos residuos es la digestión anaeróbica, la cual es eficiente y sostenible [1], eficaz para el tratamiento de efluentes de alta carga [28], [29], además de producir biogás con impacto ambiental mínimo [10]. La codigestión con sustratos complementarios mejora su producción [30]. El diseño experimental de mezclas es una técnica para evaluar sus componentes y maximizar la respuesta [10]: al seleccionar diferentes proporciones y determinar sus niveles, se puede identificar el óptimo. Por su parte, Minitab es una herramienta de procesamiento que permite generar resultados con un número mínimo de experimentos [31].

Sin embargo, son pocos los estudios que han investigado la codigestión del estiércol, contenido ruminal y sangre bovina, lo que evidencia una oportunidad investigativa para la optimización de esta mezcla. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo identificar la proporción óptima de codigestión de sangre, estiércol y contenido ruminal mediante ensayos BMP y un diseño experimental de mezclas, de manera que pueda maximizarse la producción de biogás en instalaciones productivas de este tipo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Caracterización de Sustratos

La recolección de estos sustratos se realizó de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma VDI 4630 [32]. Tras su recolección, los sustratos ES, CR y SA fueron homogenizados. Las muestras fueron colocadas en bolsas herméticas y transportadas al laboratorio bajo condiciones refrigeradas. Una vez recibidas en laboratorio, las muestras fueron congeladas a -20 °C y almacenadas hasta su utilización.

B. Fuente de Inóculo

Se obtuvo el inóculo de un reactor de digestión anaeróbica tubular a escala real que produce biogás en condiciones psicotrópicas, ubicado en la Universidad Peruana Unión (UPEU), sede Juliaca, departamento de Puno. Este inóculo fue

tamizado para eliminar partículas gruesas y se preincubó adecuadamente para su posterior análisis. Antes de iniciar el experimento, se realizó el análisis de las características fisicoquímicas tanto del inóculo como del ES, CR y SA.

C. Diseño Experimental

Para determinar la proporción óptima de la mezcla de sustratos, se empleó un diseño de mezclas tipo simplex-centroide aumentado (ASCD). Este enfoque permite analizar las interacciones entre los componentes, evaluando tanto el efecto individual como la influencia de sus combinaciones sobre las respuestas experimentales observadas [10]. De esta manera, se logró identificar la mezcla óptima y se redujo al mínimo las propiedades indeseables de los materiales utilizados, las cuales se representaron gráficamente en un triángulo de mezclas [33], [34]. Este diseño entonces, permite establecer la combinación más adecuada entre los tres sustratos evaluados [35].

Los puntos experimentales generados se distribuyen en un triángulo de mezclas (ver fig. 1), cuyos vértices corresponden a (X_1 , X_2 y X_3 ; 1, 2 y 3). Las mezclas binarias se ubican en los lados del triángulo, correspondientes a $X_1=X_2$, $X_1=X_3$ y $X_2=X_3$ (puntos 4, 5 y 6), lo que permite evaluar las interacciones entre pares de sustratos. El punto 7, situado en el centro del triángulo, representa la mezcla equitativa de los tres componentes ($X_1=X_2=X_3$). Por otro lado, los puntos 8, 9 y 10 corresponden a combinaciones ternarias aumentadas, aquellos son puntos de validación para el análisis del modelo [33], [36].

Todos los tratamientos (Tabla I) son replicados tres veces con el fin de medir el error experimental y asegurar la confiabilidad del modelo [33], [35]

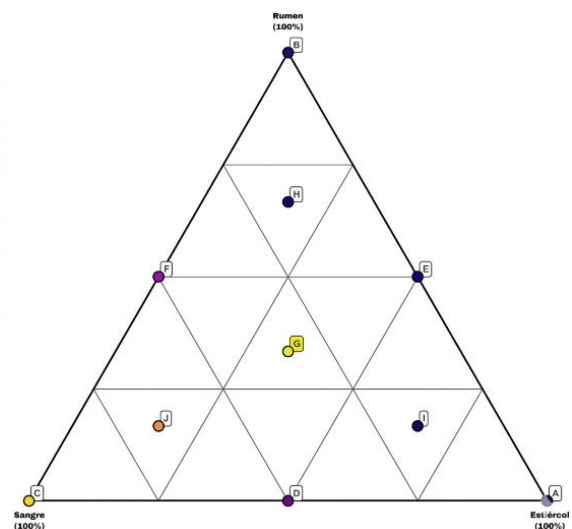


Fig. 1 Variables de entrada A (estiércol vacuno %), B (contenido ruminal %) y C (Sangre %) que representa los 7 puntos básicos y 3 axiales.

TABLA 1

DISEÑO CENTROIDE SIMPLEX

Experimento	SA	ES	CR
C	100%	0%	0%
J	66,67%	16,67%	16,67%
D	50%	50%	0%
F	50%	0%	50%
G	33,33%	33,33%	33,33%
H	16,67%	16,67%	66,67%
I	16,67%	66,67%	16,67%
A	0%	100%	0%
E	0%	50%	50%
B	0%	0%	100%

D. Métodos analíticos

Se analizaron diversos parámetros fisicoquímicos para cada materia prima, incluyendo sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), humedad y cenizas. La determinación de ST y SV se realizó mediante técnica gravimétrica, conforme a los métodos 2540B y 2540C establecidos por APHA-AWWA-WEF [37]. Para ello, las muestras se secaron a 105 °C durante 24 horas en una estufa Binder FD023UL-120 V (Tuttlingen, Alemania) hasta alcanzar peso constante. Luego, se enfriaron en un desecador y se pesaron para calcular los ST.

Para la cuantificación de SV y cenizas las muestras secas se incineraron a 550 °C durante 1 hora en una mufla FHX-05 (Daihan Scientific, Wonju, Corea del Sur). Tras la combustión, los crisoles se enfriaron al aire, se colocaron en un desecador, y se pesaron en una balanza analítica de precisión SE2-F (Sartorius, Göttingen, Alemania) hasta obtener masa constante.

La demanda química de oxígeno (DQO) fue determinada mediante método espectrofotométrico con reflujo cerrado, siguiendo procedimientos estandarizados. Para la medición de ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad total (AT) y pH, las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm durante 30 minutos, y se utilizó el sobrenadante para los análisis. Los valores de AGV y AT se determinaron por titrimetría [38], y se utilizó la relación AGV/AT como indicador de capacidad buffer. Estas determinaciones se aplicaron únicamente a la sangre. El pH fue medido mediante técnica potenciométrica con un multiparámetro HI5521-01 (Hanna Instruments, Providence, EE. UU.).

Todos los análisis se realizaron por triplicado para asegurar la precisión y la reproducibilidad de los resultados.

D. Pruebas del potencial bioquímico de metano

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Ingeniería de Saneamiento Ambiental II de la UPeU, sede Juliaca, Perú. Se prepararon diez mezclas ES, CR y SA, según su concentración de SV. El inóculo fue sometido a un período de preincubación de cinco días con el fin de consumir la materia orgánica biodegradable residual, y se aplicó una relación inóculo/sustrato (I/S) de 2 con base en SV. Las pruebas se ejecutaron por triplicado en frascos de vidrio de 120 ml, con 60 ml de volumen de operación y 60 ml de espacio de cabeza. Se incluyó un control sin sustrato y no se añadió agua en ningún tratamiento. Tras el montaje, se purgó nitrógeno durante 3 minutos en el espacio de cabeza [39]. Los frascos se sellaron con tapones de caucho butílico y capuchones de aluminio engrasados, e incubaron a 35 °C. La producción de biogás se cuantificó cada tres días.

E. Cálculo del método GD-BMP

La cuantificación de metano y biogás durante el experimento se realizó mediante el método basado en la densidad de gases (GD_BMP) [40]. Los ensayos se llevaron a cabo bajo condiciones estándar de 273,15 K y 100 kPa. Este método se fundamenta en la medición de la pérdida de masa del recipiente y el volumen de biogás liberado, permitiendo determinar tanto la densidad como la composición del biogás. La densidad se calculó a partir de la relación entre la pérdida de masa del sistema y el volumen de biogás generado, corregido por el contenido de vapor de agua presente en el gas [39], conforme a la ecuación (1).

$$\rho_b = \frac{\Delta m_b}{v_b} - C_{H_2O} \quad (1)$$

La fracción molar de metano de biogás se calculó de los pesos molares de dióxido de carbono puro (2,0 mg ml⁻¹), el metano puro (0,72 mg ml⁻¹) y el biogás, donde el volumen molar del biogás se tomó en condiciones estándar [40], [41]. La presión del vapor de agua se calculó considerando la temperatura del espacio de cabeza (T_{hs}), de acuerdo con la ecuación (2). La presión interna del frasco antes del venteo (ρ_{hs}), el volumen molar estándar del gas ($v_b = 22\,300\text{ mL}\cdot\text{mol}^{-1}$), y la masa molar del agua ($M_{H_2O} = 18,02\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) se aplicó en la ecuación (3).

$$\rho_{H_2O} = 0,61094 \cdot e^{\frac{17,625T_{hs}}{243,04+T_{hs}}} \quad (2)$$

$$C_{H_2O} = M_{H_2O} \cdot \frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{hs} - \rho_{H_2O}} \cdot \frac{1}{v_b} \quad (3)$$

$$M_b = \rho_b \cdot v_b \quad (4)$$

A partir de la densidad del biogás (ρ_b), se calculó su masa molar (M_b) mediante la ecuación (4). Luego, la fracción molar de metano (xCH_4) se estimó con base en las masas molares de CH_4 , CO_2 y del biogás, bajo la suposición de que solo contiene estos dos gases [40], conforme a la ecuación (5).

$$xCH_4 = \frac{M_{CO_2} - M_b}{M_{CO_2} - M_{CH_4}}. \quad (5)$$

Cuando se emplea nitrógeno como gas de arrastre, su impacto sobre el resultado es mínimo (<5 %), especialmente si la densidad del biogás es cercana a 1,25 mg·ml⁻¹. No obstante, si quedan residuos del gas de arrastre, se pueden aplicar correcciones al volumen y masa del biogás usando las ecuaciones (6) y (7), que ajustan por el volumen (V_f) y la densidad (d_f) del gas residual [40]. La significación de los resultados se evaluó mediante ANOVA con una confianza de 95% y con diferencias significativas de $p < 0,05$, con el software Minitab.

$$V' = V_b - V_f. \quad (6)$$

$$\Delta m'_b = \Delta m_b - d_f \cdot V_f. \quad (7)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de Sustratos e Inóculo

Las características fisicoquímicas de la sangre, estiércol, contenido ruminal e inóculo se analizaron de acuerdo con los métodos y protocolos descritos en el apartado anterior y se puede visualizar en la tabla 2.

TABLA 2

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS SUSTRATOS DEL MATADERO METROPOLITANO “LA COLINA”

Parámetro	Unidad	Sustrato			
		Sangre	Estiércol	Rumen	Inóculo
ST	g/kg	164,7 ± 0,2	150,6 ± 2,9	126,2 ± 2,5	2,5 ± 0,04
SV	g/kg	149,6 ± 1,2	115,3 ± 3,3	108,9 ± 1,3	1,4 ± 0,02
Cenizas	g/kg	15,1 ± 1,3	35,4 ± 1,4	17,2 ± 1,8	1,0 ± 0,04
Humedad	%	83,5 ± 0,03	84,9 ± 0,3	87,4 ± 0,3	99,8 ± 0,0
AGV	mg HAc/L	8469,6 ± 122,6	-	-	-
AT	mg CaCO ₃ /L	11270,0 ± 396,1	-	-	-
pH		7,3 ± 0,0	-	-	-
DQO	mg/l	124843 ± 1253,7	-	-	-

En relación con la sangre, el pH de $7,34 \pm 0,05$ está dentro del rango ideal (6,5-8,2) para la digestión anaeróbica [42]. El contenido de humedad fue de $83,5 \pm 0,03\%$, ligeramente superior a los valores reportados (78-79%) [43]. La concentración de AGV alcanzó $8469,60 \pm 122,68$ mg/l, valor elevado; pero inferior a umbrales asociados a inhibición, los cuales pueden llegar hasta 15000 mg/l [44]. El elevado valor de DQO (125 ± 1 g/l), evidenció un alto contenido de materia orgánica biodegradable, confirmando su potencial bioenergético [45]. La sangre de matadero presenta una DQO elevada (>2000 mg O₂·g⁻¹ VS), comparable o superior a la de vísceras y lodos de matadero (≈ 2150 – 2170 mg O₂·g⁻¹ VS) [46].

El estiércol presentó 15,1% de ST y 76% de SV, consistentes con valores reportados en la literatura con valores de 15,3% de ST y 79,3% SV [47]. Asimismo, se han reportado datos de sólidos totales de 14,35%, 14,0%, 13,4% y 13,39% [48] y de 74,7 % en SV [49]. Estos porcentajes indican suficiente materia orgánica para el proceso de la metanogénesis. El contenido de humedad se encontró en un rango usual de 80-90%, lo que confirma que el sustrato tiene potencial para generar biogás incluso mediante la mono digestión, con producciones reportadas de hasta 412 l de CH₄·kg⁻¹ [50].

El contenido ruminal presentó 12,62% de ST y 86,5% de SV respecto a los ST, valores consistentes con la literatura de 10-15% ST y 89% de SV [51]. No obstante, su fracción lignocelulósica parcialmente degradada limita su biodegradabilidad y puede limitar la hidrólisis anaerobia. Estas diferencias pueden influir en el rendimiento de metano, al depender de la fracción biodegradable del sustrato, la cual puede reducirse durante el almacenamiento y a temperaturas elevadas [52].

B. Resultados de las pruebas del potencial bioquímico de metano (BMP)

En los ensayos BMP se observó una reducción de ST, SV y DQO entre el afluente y el efluente, lo que evidenció una degradación efectiva de la materia orgánica. Los ST disminuyeron desde valores iniciales de 2,37-2,89 g/kg hasta 1,80-2,29 g/kg en el efluente, mientras que los SV se redujeron de 1,48–2,02 g/kg a 1,04–1,35 g/kg. Las mayores reducciones de SV se registraron en los tratamientos con mayor proporción de sangre (C, D y J). El pH de los afluentes se ubicó en un rango ligeramente alcalino (7,71-8,79) atribuidos al carácter nitrogenado de los sustratos. En el efluente, se mantuvo dentro del intervalo óptimo para metanogénesis (7,20 y 8,36).

La alcalinidad total osciló entre 866,67 y 1173,33 mg/l, y se mantuvo en el efluente en rangos similares (949,67-1145mg/l), lo que evidencia una capacidad amortiguadora

estable del sistema. Las concentraciones de AGV disminuyeron de 408,8 y 513,6 mg/l en el afluente a 292,4-383,6 mg/l en el efluente, reduciendo la relación AGV/AT de 0,35-0,59 a 0,26-0,37, valores <0,4, aceptados como indicadores de estabilidad en digestión anaerobia.

La DQO disminuyó desde 2093,3-3183,3 g/l en el afluente a 1508,9-2062,5 g/l en el efluente, sugiriendo una remoción eficiente de materia orgánica. Las mayores eficiencias se observaron en los tratamientos C, H e I, asociados a mayores reducciones de SV y a relaciones AGV/AT más bajas. Según la literatura, un pH adecuado y relaciones AGV/AT reducidas reflejan un proceso estable, y siempre que la concentración de amonio se mantenga en un rango óptimo, los niveles excesivos provocan inhibición, mientras que concentraciones insuficientes limitan el rendimiento metanogénico [53].

En los tratamientos analizados, el C (100% SA) presentó el mayor rendimiento, con valores de 704,5 y 742,5 ml biogás/g SV, en un tiempo de retención (THR) de 45 días. Le siguió el tratamiento J (16,67% ES, 16,67% CR y 66,67% SA), con producciones entre 667,7 y 767 ml biogás/g SV. Este comportamiento se atribuye al elevado contenido de proteínas y lípidos de la sangre, caracterizados por su rápida biodegradabilidad, lo que favorece la generación de precursores para la metanogénesis [54]. Estudios reportan potenciales de 0-0,45 m³ CH₄·kg⁻¹ proteína y 0,1-0,7 m³ CH₄·kg⁻¹ VS en materiales altamente proteicos, lo que coincide con el máximo rendimiento observado [43].

Aunque en el BMP se observó una reducción del DQO (de 2306,67 ± 184,12 a 1508,90 ± 38,36; ≈34,6%), en operación continua este sustrato puede generar inhibición por presencia de amonio. Investigaciones previas reportan que su carga de N y DQO elevadas la vuelven susceptible a inhibición por NH₃-N si se supera la capacidad tampón del sistema [43], [55] (Fig. 2).

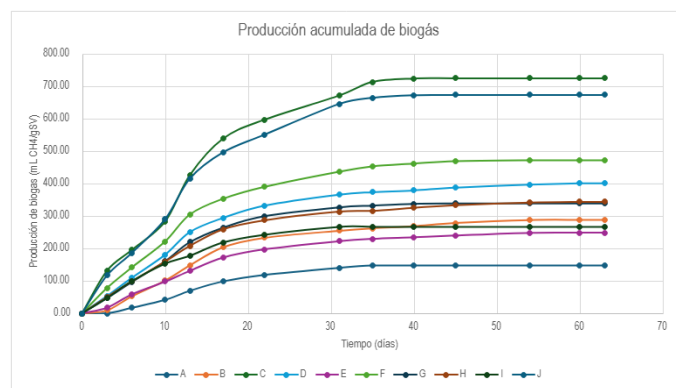


Fig. 2 Volumen de producción acumulada de biogás.

Como se puede apreciar, la mezcla J, siendo la mezcla con mayor producción acumulada de biogás, evidenció el efecto sinérgico atribuible al equilibrio entre fracciones fácilmente degradables y componentes fibrosas, así como por la dilución de posibles inhibidores mediante la presencia de trazas y minerales, en concordancia con estudios previos sobre la codigestión balanceada de residuos de origen pecuario y alimentario [51], [30]. Este patrón coincide con incrementos en la producción de metano reportados para sistemas que combinan pretratamientos y codigestión con valores que aumentan de 273 a 304 l/kg SV tras extrusión y mezcla con residuos vegetales [54]. Asimismo, estudios en residuos de plantas de renderizado y matadero destacan la influencia de altos contenidos de lípidos y proteínas, reportando potenciales de metano de 262 y 572 dm³ CH₄/ kgSV [56], rango en el cual se ubican los tratamientos C y J de este estudio.

En un nivel de intermedio se ubicaron los tratamientos D (50%ES:50%SA) y F (50%CR:50%SA), con producciones promedio cercanas a 450-490 ml biogás/g SV, seguidos por el tratamiento B (50%ES:50%SA) con valores entre 380,4 y 419,1 ml biogás/g SV. La disminución del rendimiento se asocia a la incorporación de contenido ruminal, que introduce fracciones más lignocelulósicas y de menor disponibilidad energética, ralentizando la degradación anaerobia y limitando la metanogénesis. En conjunto los resultados confirman que los sustratos con fracción lipídica y proteica favorecen una mayor producción, como se observó en C y J [57], en concordancia con estudio que señalan que la sangre puede aportar entre el 70 y 80% de potencial total de biogás en residuos de matadero bajo condiciones mesofílicas estables [58].

Los tratamientos con proporciones equilibradas (G, 33,33% de cada uno) mostraron rendimientos moderados (319,3-348,8 ml biogás/g SV), similares a los obtenidos en el tratamiento H, dominado por CR (66,67%, 16,67%ES y 16,67%SA) con valores entre 319,3 y 357,8 ml biogás/g SV.

Los menores rendimientos de biogás se registraron en los tratamientos con predominio de ES y CR. El tratamiento E (50%ES:50%CR) alcanzó valores de 238,9-256,5 ml biogás/gSV, seguido del tratamiento I (66,67%ES:16,67%CR:16,67%SA), con 227,3-292,4 ml biogás/g SV. El menor rendimiento se obtuvo en el tratamiento A (100% ES), con valores entre 133,6 y 165,4 ml biogás/g SV.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde la biodegradabilidad del estiércol bovino se incrementa principalmente cuando se somete a pretratamientos o se codigiere con residuos fácilmente degradables, como residuos alimentarios o sangre, situación distinta a la evaluada en este estudio [59]. Estudios previos indican que

pretratamientos alcalinos (por ejemplo, 3% NaOH) pueden aumentar la producción de metano hasta en 127% [60].

La ausencia de estos tratamientos, el alto contenido de nitrógeno, la fracción lignocelulósica y la lenta hidrólisis del estiércol limitan la digestión anaerobia, favoreciendo barreras cinéticas, acumulación de AGV y reducción de la metanogénesis acetoclástica cuando el pH disminuye [61], [62]. Por ello, la codigestión de sustratos predominantemente fibrosos sin pretratamientos restringe el potencial metanogénico, lo que concuerda con estudios interlaboratorio y respalda la validez metodológica de los resultados obtenidos bajo condiciones anaerobias controladas [63], [64], [65], [66].

C. Optimización de producción de biogás mediante la metodología de superficie de respuesta.

Con la finalidad de evaluar de manera integral los efectos de la composición del sustrato en la mezcla, se implementa la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) basado en los resultados obtenidos del BMP. La RSM resulta útil cuando la relación entre las variables independientes y la respuesta presenta un comportamiento no lineal, representado por funciones cuadráticas, lo cual permite identificar la proporción óptima de mezcla [10]. Además, se evaluaron seis modelos para determinar cuál presenta el mejor ajuste a los resultados.

El modelo especial cuartico fue seleccionado como el más apropiado, ya que presenta un R^2 de 0,9539, R^2 ajustado de 0,9364 y R^2 predicho de 0,9142, con una diferencia de 0,0222, lo que indica que no existe un problema con los datos y la ausencia de sobreajuste. En comparación, el modelo cuadrático y especial cúbico presentaron valores menores, de 0,9055 y 0,9061, lo cual confirma el mejor ajuste al modelo de datos.

El análisis de varianza (ANOVA) confirma la significancia del modelo seleccionado (Valor $F = 54,37$, $p < 0,000$), con una probabilidad inferior al 0,01% de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido. Los términos lineales mostraron alta significancia ($p = 0,000$), mientras que los términos cuadráticos no resultaron significativos ($p = 0,399$). En cuanto a los términos cuarticos especiales fueron altamente significativos ($p = 0,001$), el término estiércol x contenido ruminal x sangre x sangre resulto ser el más relevante ($p = 0,000$, coeficiente = 12647), lo cual indica que los componentes de mezcla actúan de forma sinérgica. Sin embargo, la prueba de falta de ajuste resulto estadísticamente significativa ($F = 38,04$, $p = 0,000$), lo cual indica que el modelo no especifica correctamente la relación entre la respuesta y los predictores. A pesar de la falta de ajuste, el modelo presenta una capacidad predictiva de R^2 de 0,9539.

El modelo obtenido fue el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Biogás} = & 160,7 (ES) + 304,7 (CR) + 732,6 (SA) + \\ & 121 (ES \times CR) - 123 (ES \times SA) - 129 (CR \times SA) - \\ & 5901 (ES \times ES \times CR \times SA) - 5378 (ES \times CR \times \\ & CR \times SA) + 12647 (ES \times CR \times SA \times SA) \end{aligned} \quad (8)$$

En la superficie de respuesta se identifica que el experimento compuesto por 100% sangre registró la mayor producción de biogás en contraste con los otros. La optimización de la variable de producción en función a la mezcla determinó que la relación de SA, CR y ES de 1:0:0 generó 732.56 ml biogás/g SV (Fig. 3) con una deseabilidad de 0,955, valor próximo al óptimo teórico de 1. Sin embargo, es necesario indicar que dicha composición puede interrumpir la producción de biogás debido a la presencia de amoníaco, la cual en concentraciones excesivas puede causar inhibición, toxicidad y resultar en una falla del proceso [67].

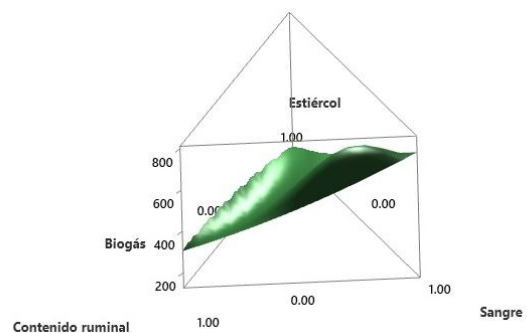


Fig. 3. Superficie de respuesta de la combinación de los tres sustratos.

Se identificó una segunda alternativa óptima correspondiente a la mezcla compuesta por 66,6% de SA, 16,6% de CR y 16,6% de ES, la cual presentó una producción de biogás comprendida entre 600 y 700 mL/g SV (Fig. 4). Esta codigestión representa una oportunidad para mitigar problemas como la inhibición por amoníaco, acidificación e inestabilidad del proceso [71]. Además, el análisis ANOVA identificó que esta interacción de sustratos es el término más significativo ($p\text{-value} = 0,000$).

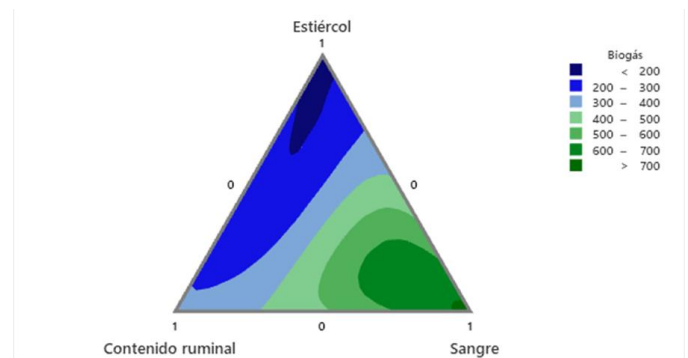


Fig. 4. Gráfica de contorno de mezcla del biogás

La proporción óptima de la mezcla ternaria se determinó mediante el análisis de la producción de biogás. El gráfico de trazas de Piepel (Fig. 5), permitió analizar los cambios en la variable dependiente en función a la variación de la mezcla. Las pendientes más pronunciadas indican un mayor impacto del cambio en la proporción de un componente sobre la variable de respuesta [68], [69].

La Fig. 5 revela patrones diferentes en el efecto de cada sustrato sobre la producción de biogás. La sangre presenta una curva exponencial ascendente, lo cual se interpreta como el componente de mayor impacto en la producción de biogás. El estiércol presenta una relación inversamente proporcional a la producción, debido a su tendencia negativa pronunciada y el menor desempeño individual. En cuanto al contenido ruminal, este tiene un efecto ligeramente negativo, aunque se mantiene estable, asimismo su contribución es moderada.

Ante ello, la maximización de la producción se logra incrementando la proporción de sangre hasta el límite técnicamente viable, correspondiente a la mezcla óptima de 66,6% de sangre, 16,6 % de contenido ruminal y 16,6% de estiércol.

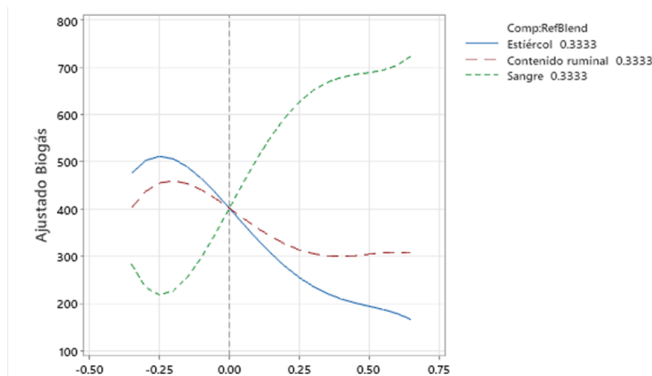


Fig. 5. Gráfico de trazas

Dicho resultado es consistente con evidencia previa que demuestra que proporciones elevadas de sangre (70%), contenido ruminal moderado (20%) y estiércol mínimo (10%), genera mayor volumen de biogás [70].

Lo expuesto, guarda concordancia con el análisis del gráfico de trazas y confirma el efecto sinérgico de los sustratos identificado en el ANOVA, donde la maximización de sangre y la mínima participación del estiércol en la mezcla resulta en mayor producción.

El presente estudio ha permitido identificar las proporciones óptimas de codigestión entre sangre, contenido ruminal y estiércol. No obstante, es importante reconocer una limitación al no aplicar un modelamiento matemático, como la aplicación de modelos cinéticos como Gompertz modificado, el modelo logístico o el modelo de cono. Se hubiera podido estimar parámetros clave como la tasa máxima de crecimiento, la cantidad máxima de crecimiento y el tiempo de retardo [71], la cual complementaría los resultados experimentales con información predictiva importante para el escalamiento y optimización del proceso.

Estos resultados tienen implicancias prácticas para el sector cárnico. En el caso de estudio tanto la sangre como el contenido ruminal se generan en mayor proporción en relación con el estiércol, lo cual favorece la implementación de la mezcla óptima identificada. Sin embargo, para alcanzar la proporción óptima (con 66% de SA) se requiere de ajustes en la infraestructura del caso de estudio para garantizar su segregación adecuada de cada residuo.

Así, los mataderos enfrentan grandes desafíos en la gestión de residuos orgánicos, los cuales representan un riesgo significativo para el ambiente y la salud pública. Y como hemos visto, la codigestión se puede constituir una solución técnicamente viable que permita transformar estos residuos en recursos energéticos, integrándose así a principios ecológicos como el de economía circular. Además, el uso del biogás reduce los impactos asociados a los riesgos económicos y ambientales generados por el uso de combustibles fósiles [72]. Se espera que estudios en esta línea constituyan insumos valiosos para promover el aprovechamiento energético y la implementación de sistemas de codigestión anaeróbica de residuos orgánicos en instalaciones como la estudiada, dentro y fuera de Perú.

AGRADECIMIENTOS

Reciba nuestro mayor agradecimiento la Universidad Peruana Unión, sede Juliaca-Perú, por facilitar el uso del laboratorio para el desarrollo de esta investigación. También expresamos nuestra gratitud al matadero metropolitano “La Colina” por el suministro de muestras, información técnica proporcionada y el apoyo para la comprensión del proceso de generación de residuos.

REFERENCES

- [1] K. Bułkowska and M. Zielińska, “Recovery of Biogas and Other Valuable Bioproducts from Livestock Blood Waste: A Review,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 23, p. 5873, Nov. 2024, doi: 10.3390/en17235873.

- [2] A. Calves, "El futuro del sector cárnico: Un cambio del modelo productivo," *Gracián Revista de investigación universitaria* N.º 1-2025, 2025.
- [3] S. Wang, U. Jena, and K. Das, "Long term performance of pilot methanogenic digester filled with seashell wastes treating slaughterhouse wastes: Biogas production and environmental impact," *Biochem. Eng. J.*, vol. 187, p. 108651, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.bej.2022.108651.
- [4] OECD-FAO, *OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033*. OECD, 2024. doi: 10.1787/4c5d2cfb-en.
- [5] C. Guamán-Marquines, R. Mendoza-Loor, Y. Gómez-Salcedo, and R. Baquerizo-Crespo, "Assessment of the start-up of tubular reactors on a laboratory scale for the anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater," *International Journal of Thermofluids*, vol. 19, p. 100378, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100378.
- [6] M. Hellal and H. Doma, "Combined slaughterhouse wastewater treatment via pilot plant chemical coagulation followed by 4th generation downflow hanging sponge (DHS-4G)," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 57, no. 10, pp. 891–901, Aug. 2022, doi: 10.1080/10934529.2022.2130634.
- [7] P. E. Ohale, M. I. Ejimofor, C. E. Onu, M. Abonyi, and N. J. Ohale, "Development of a surrogate model for the simulation of anaerobic co-digestion of pineapple peel waste and slaughterhouse wastewater: Appraisal of experimental and kinetic modeling," *Environmental Advances*, vol. 11, 2023, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100340.
- [8] V. Mozhiarasi and T. Natarajan, "Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products," *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 15, no. 2, p. 1, Jan. 2022, doi: 10.1007/S13399-022-02352-0.
- [9] W. Meneses-Quelal, B. Velázquez-Martí, J. Gaibor-Chávez, Z. Niño-Ruiz, and A. Ferrer-Gisbert, "Anaerobic Co-digestion of Slaughter Residues with Agricultural Waste of Amaranth Quinoa and Wheat," *Bioenergy Res.*, vol. 15, no. 3, pp. 1649–1663, Sep. 2022, doi: 10.1007/s12155-021-10350-9.
- [10] S. Jo, R. Kadam, H. Jang, D. Seo, and J. Park, "Elucidating Synergetic Effects of Anaerobic Co-Digestion of Slaughterhouse Waste with Livestock Manures," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 12, p. 3027, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17123027.
- [11] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, "OEFA fortalece las capacidades de personal de los camales municipales para promover el cumplimiento de obligaciones ambientales - Noticias - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - Plataforma del Estado Peruano," Nota de prensa. Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/oefa/noticias/1011559-oefa-fortalece-las-capacidades-de-personal-de-los-camales-municipales-para-promover-el-cumplimiento-de-obligaciones-ambientales>
- [12] MIDAGRI, *Anuario estadístico, producción ganadera y avícola 2023*, MIDAGRI. 2024.
- [13] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, "Visita de evaluación ambiental del centro de beneficio de animales 'camal' de la provincia de Tayacaja - Huancavelica," 2011.
- [14] F. Montalvo, A. Da Cruz, A. Fernandez, P. Romero, and S. Zavala, "Caracterización de residuos y estrategias para la mejora de la sostenibilidad a nivel de mataderos," *Revista Alfa*, vol. 8, no. 24, pp. 981–1000, Sep. 2024, doi: 10.33996/revistaalfa.v8i24.318.
- [15] E. Dávila, "Caracterización de residuos sólidos y efluentes (sangre) de vacunos generados en el Matadero Municipal de Punchana - 2017," Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, 2024.
- [16] P. Ruiz, "Impacto en la salud pública y el ambiente que producen las actividades de sacrificio de animales para consumo humano en el Camal Municipal de la ciudad de Moyobamba," Universidad Nacional de San Martín, 2018.
- [17] Defensoría del Pueblo, "Defensoría del Pueblo: municipalidades deben garantizar salubridad en camales de Tumbes."
- [18] J. Padilla, R. Pardo, and J. Molina, "Manejo integrado de los riesgos ambientales y el control de vectores: una nueva propuesta para la prevención sostenible y el control oportuno de las enfermedades transmitidas por vectores," *Biomedica*, vol. 37, p. 2, 2017.
- [19] M. Wiśniewska and M. Szyłak, "The Impact of Objects with a Potential Odour Nuisance on the Life Comfort of the Urban Agglomeration Inhabitants," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, p. 10708, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142210708.
- [20] F. Reyes-Mena, J. Muzzio-Aroca, and E. Sánchez-Muñoz, "Enfermedades causadas por vectores y factores de prevención en zonas urbana de Manabí-Ecuador," *Revista Arbitrada Interdisciplinaria de Ciencias de la Salud. Salud y Vida*, vol. 4, no. 8, p. 44, Jul. 2020, doi: 10.35381/s.v.v4i8.931.
- [21] Servicio Nacional de Sanidad Agraria del Perú & Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Comunicándonos. Boletín informativo SENASA - Servidores del campo. Boletín informativo," 10, pp. 1–36, 2016.
- [22] L. Berrios and E. Urquizar, "Tratamiento de aguas residuales del camal la Colina - Pedregal usando el método de reactor UASB," Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2020.
- [23] M. Limache, "Evaluación de Riesgos Sanitario – Ambiental en el Camal Municipal De La Provincia De El Collao – Ilave," Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 2021. Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/17094/Limache_Ccallo_Marisol.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [24] L. Berrios and E. Urquizar, "Tratamiento de aguas residuales del camal la Colina - Pedregal usando el método de reactor UASB," Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2020.
- [25] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), "Reporte de denuncia, SC-4046-2023. Buscador de Denuncias Ambientales," 2023.
- [26] Diario CORREO, "Lagunas de oxidación de aguas servidas del camal de Majes sin solución a la vista | EDICION | CORREO," AREQUIPA, Jan. 09, 2019. Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/lagunas-de-oxidacion-de-aguas-servidas-del-camal-de-majes-sin-solucion-la-vista-863855/>
- [27] AZB NOTICIAS, "(80) Pozos del camal de La Colina-Majes- con olores contaminantes - YouTube," Oct. 2015. Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=z38w48AZZug>
- [28] D. Tsegaye, M. Khan, and S. Leta, "Optimization of Operating Parameters for Two-Phase Anaerobic Digestion Treating Slaughterhouse Wastewater for Biogas Production: Focus on Hydrolytic–Acidogenic Phase," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5544, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065544.
- [29] M. Chowdhury *et al.*, "Recycling slaughterhouse wastes into potential energy and hydrogen sources: An approach for the future sustainable energy," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 19, p. 101133, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101133.
- [30] K. Mutisi and M. Moreroa, "Co-Digestion of Abattoir Effluent and Rumen Content for Waste Management and Biogas Production," *IET Renewable Power Generation*, vol. 19, no. 1, p. e70123, Jan. 2025, doi: 10.1049/RPG2.70123;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [31] A. Reza, L. Chen, and K. Kruger, "Microwave irradiated ammonia nitrogen removal from anaerobically digested liquid dairy manure: A response surface methodology and artificial neural network-based optimization and modeling," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 5, p. 108279, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.JECE.2022.108279.
- [32] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI 4630:2006."
- [33] A. Naji, A. Dujany, S. Guerin Rechdaoui, V. Rocher, A. Paus, and T. Ribeiro, "Optimization of Liquid-State Anaerobic Digestion by Defining the Optimal Composition of a Complex Mixture of Substrates Using a Simplex Centroid Design," *Water 2024, Vol. 16, Page 1953*, vol. 16, no. 14, p. 1953, Jul. 2024, doi: 10.3390/W16141953.
- [34] I. Mountapbeme *et al.*, "Application of augmented simplex-centroid mixture design in developing and optimizing new low-cost

- microfiltration membranes from clays and cassava peels for bacteria removal,” *International Journal of Ceramic Engineering and Science*, vol. 6, no. 5, p. e10231, Sep. 2024, doi: 10.1002/CES2.10231;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:25783270.
- [35] P. Hwangdee, S. Charee, W. Kheowkrai, C. Junsiri, and K. Laloon, “Application of the Simplex-Centroid Mixture Design to Biomass Charcoal Powder Formulation Ratio for Biomass Charcoal Briquettes,” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 3940, vol. 14, no. 7, p. 3940, Mar. 2022, doi: 10.3390/SU14073940.
- [36] S. Djimtoingar, N. Derkyi, and F. Kuranchie, “Optimisation of the anaerobic co-digestion process of Calotropis procera leaves, stems, and cow dung using a mixture design,” *S. Afr. J. Chem. Eng.*, vol. 45, pp. 283–293, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.sajce.2023.06.008.
- [37] APHA-AWWA-WEF, “American Public Health Association (APHA), American... - Google Académico.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: [https://scholar.google.com/scholar?q=American%20Public%20Health%20Association%20\(APHA\)%2C%20American%20Water%20Works%20Association%20\(AWWA\)%2C%20Water%20Environment%20Federation%20\(WEF\)%2C%202017.%20Standard%20Method%20for%20the%20Examination%20of%20Water%20and%20Wastewater%2C%202023rd%20ed](https://scholar.google.com/scholar?q=American%20Public%20Health%20Association%20(APHA)%2C%20American%20Water%20Works%20Association%20(AWWA)%2C%20Water%20Environment%20Federation%20(WEF)%2C%202017.%20Standard%20Method%20for%20the%20Examination%20of%20Water%20and%20Wastewater%2C%202023rd%20ed).
- [38] B. Jobling, S. Thai, T. Fritz, S. Esteves, R. Dindale, and A. Guwy, “An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste,” *Water Res.*, vol. 61, pp. 162–170, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.WATRES.2014.05.020.
- [39] O. Mendieta, G. Madrigal, L. Castro, J. Rodríguez, and H. Escalante, “Sugarcane scum as a novel substrate for rapid biogas production from the non-centrifugal cane sugar agribusiness sector in developing countries,” *Bioresour. Technol.*, vol. 297, p. 122364, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2019.122364.
- [40] C. Justesen *et al.*, “Development and Validation of a Low-Cost Gas Density Method for Measuring Biochemical Methane Potential (BMP),” *Water (Basel)*, vol. 11, no. 12, p. 2431, Nov. 2019, doi: 10.3390/w11122431.
- [41] G. Madrigal, M. Huaraya, T. Sancho, O. Mendieta, and J. Jaimes-Estévez, “Biochar from bovine manure as a sustainable additive to improve the anaerobic digestion of cheese whey,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 20, p. 101258, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.BITEB.2022.101258.
- [42] K. Adou, O. Alle, A. Kouakou, K. Adouby, P. Drogui, and R. Tyagi, “Anaerobic mono-digestion of wastewater from the main slaughterhouse in Yamoussoukro (Côte d’Ivoire): Evaluation of biogas potential and removal of organic pollution,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 3, p. 103770, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103770.
- [43] T. Nazifa, N. Saady, C. Bazan, S. Zendeheboudi, A. Aftab, and T. Albayati, “Anaerobic Digestion of Blood from Slaughtered Livestock: A Review,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 18, p. 5666, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185666.
- [44] J. Plácido and Y. Zhang, “Production of volatile fatty acids from slaughterhouse blood by mixed-culture fermentation,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 8, no. 3, pp. 621–634, Sep. 2018, doi: 10.1007/s13399-018-0313-y.
- [45] A. Ahmad, R. Ghufuran, Q. Nasir, F. Shahitha, M. Al-Sibani, and A. Al-Rahbi, “Enhanced anaerobic co-digestion of food waste and solid poultry slaughterhouse waste using fixed bed digester: Performance and energy recovery,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 30, p. 103099, May 2023, doi: 10.1016/j.eti.2023.103099.
- [46] J. Perez-Remedios, K. Rodríguez, C. Díaz, D. Escalante, and L. Díaz, “Assessing the biogas potential of slaughterhouse waste in Tenerife: A sustainable approach to waste management in an outermost European region,” *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103389, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103389.
- [47] R. Camacho, H. Villada, and J. Hoyos, “Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos,” *Información tecnológica*, vol. 28, no. 3, pp. 29–36, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000300004.
- [48] R. Aremanda, S. Debretson, S. Tesfalem, and R. Menghisteab, “Competence of Cow Manure as a Sustainable Feedstock for Bioenergy and Biofertilizer Production,” *International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources*, vol. 4, no. 2, pp. 59–67, Jun. 2023, doi: 10.46676/ij-fanres.v4i2.135.
- [49] M. Martinez, “Potencial energético de la digestión anaerobia del estiércol del ganado vacuno, porcino y avícola en Sonora (México),” *LADEE*, vol. 2, no. 2, pp. 24–31, 2021.
- [50] M. Adghim, M. Abdallah, S. Saad, A. Shanableh, and M. Sartaj, “Assessment of the biochemical methane potential of mono- and co-digested dairy farm wastes,” *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 38, no. 1, pp. 88–99, Jan. 2020, doi: 10.1177/0734242X19871999.
- [51] A. Ihoeghian *et al.*, “Anaerobic co-digestion of cattle rumen content and food waste for biogas production: Establishment of co-digestion ratios and kinetic studies,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 18, p. 101033, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.biteb.2022.101033.
- [52] H. Yu, H. Kim, D. Kim, H. Choi, G. Baek, and C. Lee, “Seasonal and storage effects on characteristics and anaerobic digestibility of cattle manure,” *Bioresour. Technol.*, vol. 440, p. 133535, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2025.133535.
- [53] J. Procházka, P. Dolejš, J. MácA, and M. Dohányos, “Stability and inhibition of anaerobic processes caused by insufficiency or excess of ammonia nitrogen,” *Applied Microbiology and Biotechnology* 2011 93:1, vol. 93, no. 1, pp. 439–447, Oct. 2011, doi: 10.1007/S00253-011-3625-4.
- [54] S. Porselvam, N. Soundara, and S. Srinivasan, “Enhanced biogas yield by thermo-alkali solubilization followed by co-digestion of intestine waste from slaughterhouse with food waste,” *3 Biotech*, vol. 7, no. 5, Oct. 2017, doi: 10.1007/S13205-017-0936-X.
- [55] J. Perez-Remedios, K. Rodríguez, C. Díaz, D. Escalante, and L. Díaz, “Assessing the biogas potential of slaughterhouse waste in Tenerife: A sustainable approach to waste management in an outermost European region,” *Results in Engineering*, vol. 24, p. 103389, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103389.
- [56] S. Bayr, M. Rantanen, P. Kaparaju, and J. Rintala, “Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes,” *Bioresour. Technol.*, vol. 104, pp. 28–36, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2011.09.104.
- [57] I. Moukakis, F. Pellera, and E. Gidakos, “Slaughterhouse by-products treatment using anaerobic digestion,” *Waste Management*, vol. 71, pp. 652–662, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.WASMAN.2017.07.009.
- [58] M. Edström, Å. Nordberg, and L. Thyselius, “Anaerobic treatment of animal byproducts from slaughterhouses at laboratory and pilot scale,” *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2003 109:1, vol. 109, no. 1, pp. 127–138, Apr. 2003, doi: 10.1385/ABAB:109:1-3:127.
- [59] G. Kim, J. Park, S. Park, and S. Kim, “Continuous semi-dry anaerobic co-digestion of cattle manure and food waste: Performance evaluation and microbial community dynamics,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 40, p. 104676, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.ETI.2025.104676.
- [60] W. Lee, Y. Kim, H. Kim, and M. Kim, “Comparison of Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Livestock Manure at Various Mixing Ratios under Mesophilic and Thermophilic Temperatures,” *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 7653, vol. 16, no. 17, p. 7653, Sep. 2024, doi: 10.3390/SU16177653.
- [61] S. Neshat, M. Mohammadi, G. Najafpour, and P. Lahijani, “Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 308–322, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.137.
- [62] X. Fonoll, S. Shrestha, S. Khanal, J. Dosta, J. Mata-Alvarez, and L. Raskin, “Understanding the Anaerobic Digestibility of Lignocellulosic Substrates Using Rumen Content as a Cosubstrate

- and an Inoculum,” *ACS ES&T Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 424–435, Mar. 2021, doi: 10.1021/ACSESTENG.0C00164.
- [63] S. Abdur, P. Kumar, D. Vo, T. Devaraj, and S. Subramanian, “Biohythane as a high potential fuel from anaerobic digestion of organic waste: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 152, p. 111700, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111700.
- [64] M. Usman and B. Kiaer, “Improving the biogas yield of manure: Effect of pretreatment on anaerobic digestion of the recalcitrant fraction of manure,” *Bioresour. Technol.*, vol. 321, p. 124427, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.124427.
- [65] A. Soares *et al.*, “Prospecting substrates and co-substrates for year-round biogas production in Brazilian sugarcane mills: Innovative arrangements scenarios,” *Biomass Bioenergy*, vol. 208, p. 108828, May 2026, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2025.108828.
- [66] F. Raposo *et al.*, “Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: Evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 86, no. 8, pp. 1088–1098, Aug. 2011, doi: 10.1002/JCTB.2622;CTYPE:STRING:JOURNAL.
- [67] M.-N. Mansour *et al.*, “Influence of substrate/inoculum ratio, inoculum source and ammonia inhibition on anaerobic digestion of poultry waste,” *Environ. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 1894–1907, Apr. 2024, doi: 10.1080/09593330.2022.2157754.
- [68] N. R. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*. Wiley, 1998. doi: 10.1002/9781118625590.
- [69] S. Jo, R. Kadam, H. Jang, D. Seo, and J. Park, “Elucidating Synergetic Effects of Anaerobic Co-Digestion of Slaughterhouse Waste with Livestock Manures,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 12, p. 3027, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17123027.
- [70] O. Reategui *et al.*, “Biogas production in batch in anaerobic conditions using cattle manure enriched with waste from slaughterhouse,” *2017 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2017*, vol. 2017-January, pp. 819–822, Dec. 2017, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191173.
- [71] J. Wang and X. Guo, “The Gompertz model and its applications in microbial growth and bioproduction kinetics: Past, present and future,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 72, p. 108335, May 2024, doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108335.
- [72] I. Nordin, K. Elofsson, and T. Jansson, “Cost-effective reductions in greenhouse gas emissions: Reducing fuel consumption or replacing fossil fuels with biofuels,” *Energy Policy*, vol. 190, p. 114138, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.ENPOL.2024.114138.