

Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de estiércol vacuno y residuos agrícolas

Nicole Justiniano Costas

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2019

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de estiércol vacuno y residuos agrícolas

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Nicole Justiniano Costas

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2019

Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de estiércol vacuno y residuos agrícolas

Nicole Justiniano Costas

Resumen. El crecimiento de los sectores agrícolas y ganaderos tienen una relación directa con el incremento en la generación de residuos orgánicos, cuyo manejo inapropiado genera impactos en el ambiente y sostenibilidad de estas actividades. La codigestión es la mezcla de dos o más residuos durante el proceso de digestión anaerobia, aprovechando su composición y disponibilidad estacional. Este estudio cuantificó la producción de residuos de maíz y soya de terrenos ubicados Bolivia y Zamorano respectivamente y la producción del metano obtenido durante el proceso de codigestión de estiércol vacuno, combinado este sustrato con cada residuo agrícola en proporciones de 30:70, 50:50 y 70:30. Se utilizaron reactores batch operados con una carga orgánica de 1 kg SV/m³ que fueron incubados a 35 °C durante 63 días. Los resultados denotan que la productividad de metano fue superior al digerir el estiércol de forma individual, obteniendo un resultado de 0.302 m³ CH₄/kg SV (P < 0.05). Para los ensayos de codigestión se obtuvo el mayor rendimiento a partir de la mezcla 70:30 de estiércol y maíz con un resultado de 0.288 m³ CH₄/kg SV (P < 0.05). Para el caso de Bolivia, el escenario más favorable se obtiene para la mezcla 30:70 de estiércol y soya, fundamentado en la disponibilidad estacional de ambos residuos. Asimismo, el mejor escenario para Zamorano es el tratamiento de 70:30 de estiércol y maíz estimando un potencial de energía de 234.60 MWh por año.

Palabras clave: Biogás, digestión anaerobia, índice de producción de metano, rastrojo de maíz, rastrojo de soya.

Abstract. The growth of the agricultural and livestock sectors have a direct relationship with organic waste generation, where it's inappropriate handling, results in environmental impacts that affect the sustainability of these activities. Co-digestion is the mixture of two or more residues during the anaerobic digestion process, taking advantage of their composition and seasonal availability. This study quantified the production of corn and soybean stubble from farms located in Bolivia and Zamorano respectively. The methane production from co-digestion of cattle manure and each feedstock mixed at 30:70, 50:50 and 70:30 proportions was measured. Batch reactors were used with an organic load of 1 kg SV/m³ and incubated at 35 °C for 63 days. The results indicate that methane productivity was higher when it was digested manure individually, obtaining a result of 0.302 m³ CH₄/kg SV (P < 0.05). For co-digestion the highest yield was obtained from the 70:30 mixture of manure and corn with a result of 0.288 m³ CH₄ / kg SV (P < 0.05). In the case of Bolivia, the most favorable scenario is obtained for the 30:70 cattle manure and stubble soy, based on the seasonal availability of both residues. Likewise, the best scenario for Zamorano is the treatment of 70:30 of manure and corn, estimating an energy potential of 234.60 MWh per year.

Key words: Anaerobic digestion, biogas, corn stubble, methane production index, soy stubble.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
4. CONCLUSIONES.....	20
5. RECOMENDACIONES.....	21
6. LITERATURA CITADA	22
7. ANEXOS	25

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Parámetros físicoquímicos realizados para caracterizar los sustratos	5
2. Diseño experimental con la carga organica evaluada con diferentes relaciones de sólidos volátiles	7
3. Cuantificación de residuos de maíz y soya.....	10
4. Caracterización de rastrojos de maíz y soya por diversos autores.	11
5. Caracterización de estiércol vacuno por diversos autores.	12
6. Resultados de la caracterización de estiércol vacuno, rastrojos de maíz y soya.....	12
7. Comparación de índice de producción de metano por cada tratamiento.....	15
8. Prueba de análisis de varianza (ANDEVA).	17
9. Diferencia de medias en los diferentes tratamientos.	17
10. Potencial energético de la biomasa para el escenario de Zamorano.	19
11. Potencial energético de la biomasa para el escenario de Bolivia.	19
Figuras	Página
1. Sitio de recolección de muestras de maíz en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano.....	3
2. Cuantificación de CH ₄ por volumetría de KOH.	7
3. Producción diaria de CH ₄ para los tratamientos de digestión.....	13
4. Producción diaria de CH ₄ para los tratamientos de codigestión de soya.....	14
5. Producción diaria de CH ₄ para los tratamientos de codigestión de maíz.	15
6. Índice de producción de metano por cada tratamiento.	16
7. Índice de productividad de metano para los tratamientos analizados.....	18
Anexos	Página
1. Cuantificación de rastrojos de soya en Bolivia.	24
2. Cuantificación de rastrojos de maíz en Zona 1.	24
3. Reactores del tratamiento de digestión y codigestión anaerobia.	25
4. Incubación de reactores batch.	25
5. Disponibilidad de rastrojos de soya y maíz en diferentes países.....	26

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico plantea un desafío para el sector agrícola e industrial, particularmente en la garantía de la seguridad alimentaria, nutricional y los impactos derivados de este sector productivo (Kamilaris, Anton, Blasi y Prenafeta-Boldú, 2018). La agricultura genera cantidades importantes de residuos orgánicos o subproductos de cultivos como tallos y hojas provenientes de la limpieza y la cosecha. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017), las emisiones generadas en Latinoamérica provenientes de residuos de los cultivos contribuyen un total de 29,213.59 Gg de CO₂ eq representando el 13% de las emisiones mundial.

La producción de maíz y soya es una actividad agrícola relevante, ya que estos cultivos forman parte de la alimentación básica y permiten la generación de productos derivados. En el último medio siglo, la soya ha llamado la atención y se considera el tercer producto agrícola después del trigo y el maíz (Abdulkhani, Alizadeh, Hedjazi y Hamzeh, 2017). Según FAOSTAT (2017), en Latinoamérica se registró un total de 36,781,835 hectáreas de maíz durante el año 2017. Mientras que el área cultivada para soya es de 57,373,865 hectáreas obteniendo una mayor área cultivada en la soya.

La utilización de rastrojos como cobertura es una práctica común que consiste en la incorporación de residuos en el suelo con la finalidad de mantener y aumentar la materia orgánica. Los rastrojos afectan las propiedades como la temperatura del suelo, biológicos como la mineralización e inmovilización de nutrientes y químicos como el contenido de carbono y nitrógeno en la materia orgánica (Morón, 2001). Un estudio demuestra que se obtiene un 50% de rastrojos en el suelo del total del cultivo, de la cual el 50% son tallos (Pordesimo, Edens y Sokhansanj, 2004). Los resultados obtenidos por Galarza et al. (2011) reportan un promedio de 7 Ton/ha de rastrojos de maíz que permanecen en el suelo después de cosecha. La composición de estos denota su potencial para transformación, obteniendo beneficios energéticos y ambientales.

Por otra parte, según los datos de FAOSTAT (2017), la ganadería reporta un total de 411,261,647 de cabezas de ganado en Latinoamérica. Este rubro contribuye en 8,681.78 Gg de CO₂ eq provenientes del metano asociado a la gestión de estiércol. Para esta problemática, la digestión anaerobia es una estrategia de mitigación que contribuye a mejorar las condiciones sanitarias, aprovechando este recurso para la generación de energía y suministrar un biofertilizante para cultivos (Helguero, Bustillos y Hernani, 2018).

La digestión anaerobia es un proceso en donde compuestos complejos se transforman en compuestos más simples como CH₄, CO₂ y N-NH₃ mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Además, se obtiene como producto la fracción líquida como biol que se utiliza para mejorar el rendimiento del cultivo, la fertilidad del suelo y su estructura por la cantidad de nutrientes fermentados (Warnars y Oppenoorth, 2014).

La mezcla de dos o más residuos durante el proceso de digestión anaerobia se conoce como codigestión. Algunos estudios muestran el incremento de la productividad de metano al combinar dos o más residuos asociado a las condiciones operativas del proceso como pH, temperatura, alcalinidad, los inhibidores del sustrato, un balance de C/N, macronutrientes y micronutrientes (Astals, Ariso, Galí y Mata-Alvarez, 2011).

La producción de metano depende del contenido de materia orgánica presente en el sustrato en combinación con las condiciones operativas durante el proceso. Los sustratos que contienen un alto contenido de lignina requieren de mayor tiempo para su degradación derivando en mayor retención hidráulica (Amon, Hackl, Jeremic y Amon, 2002). La lignina presenta una estructura casi impermeable obstaculizando el proceso de hidrólisis (Zhu, Wan, y Li, 2010). Por lo tanto, no todos los cultivos son apropiados para la producción de biogás, y en su selección se deberá considerar la proporción de compuestos complejos de lenta degradación química y biológica (Pérez, Muñoz-Dorado, La Rubia y Martínez, 2002).

Estudios realizados por Carlin (2015) reportan una producción de metano de 0.43 m³/ kg SV al combinar 30% de estiércol y 70% de residuos de alimentos. Por otra parte, la investigación realizada por Yépez (2017) determinó que el mejor tratamiento en codigestión anaerobia es la combinación de 50% de Gallinaza y 50% de King Grass en condiciones mesofílicas. Finalmente, Ventura (2014) determinó la mayor productividad de metano al incrementar la proporción de rastrojos de maíz durante la codigestión con rastrojo de frijol. Se hace notar que los resultados obtenidos en estos tres estudios muestran una mayor productividad al no combinar los sustratos.

Actualmente, la digestión anaerobia es una de las propuestas más viables para utilizar los residuos del sector agrícola, ganadero e industrial aprovechando su disponibilidad estacional. La conversión energética de residuos es una estrategia de energía limpia, renovable y sostenible favoreciendo la gestión apropiada. Se plantean los siguientes objetivos para el desarrollo de la presente investigación:

- Cuantificar la cantidad de residuos de maíz y soya generados por hectárea cosechada.
- Determinar el índice de producción de metano a partir de la codigestión de estiércol vacuno y residuos de maíz y soya.
- Calcular el potencial de generación de energía a partir de la combinación óptima de residuos con base en su disponibilidad y su potencial de producción de metano.

2. METODOLOGÍA

Localización del estudio.

El desarrollo de las actividades del presente estudio se divide en dos etapas. La primera asociada a la cuantificación de residuos de cultivos y la segunda a la estimación de la productividad de metano utilizando biorreactores batch. Se realizó la selección de rastros de soja (*Glycine max*) y maíz (*Zea mays*) para su posterior codigestión con estiércol vacuno. Los residuos de soja se cuantificaron en la Finca El Bajío ubicada en el departamento de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia que cuenta con una extensión de 5,000 hectáreas. La variedad de soja utilizada es Munasqa que tiene un ciclo precoz de 110 días y una densidad de siembra de alrededor de 300,000 plantas por hectárea.

Por otra parte, el rastrojo de maíz se cuantificó en el lote 1B de la Zona 1 ubicada en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano (Figura 1). El lote 1B contó con una extensión de 29 hectáreas y una densidad de siembra de 77,000 plantas por hectárea. Se realizan las siembras en dos diferentes meses del año, durante mayo-junio y septiembre-octubre.

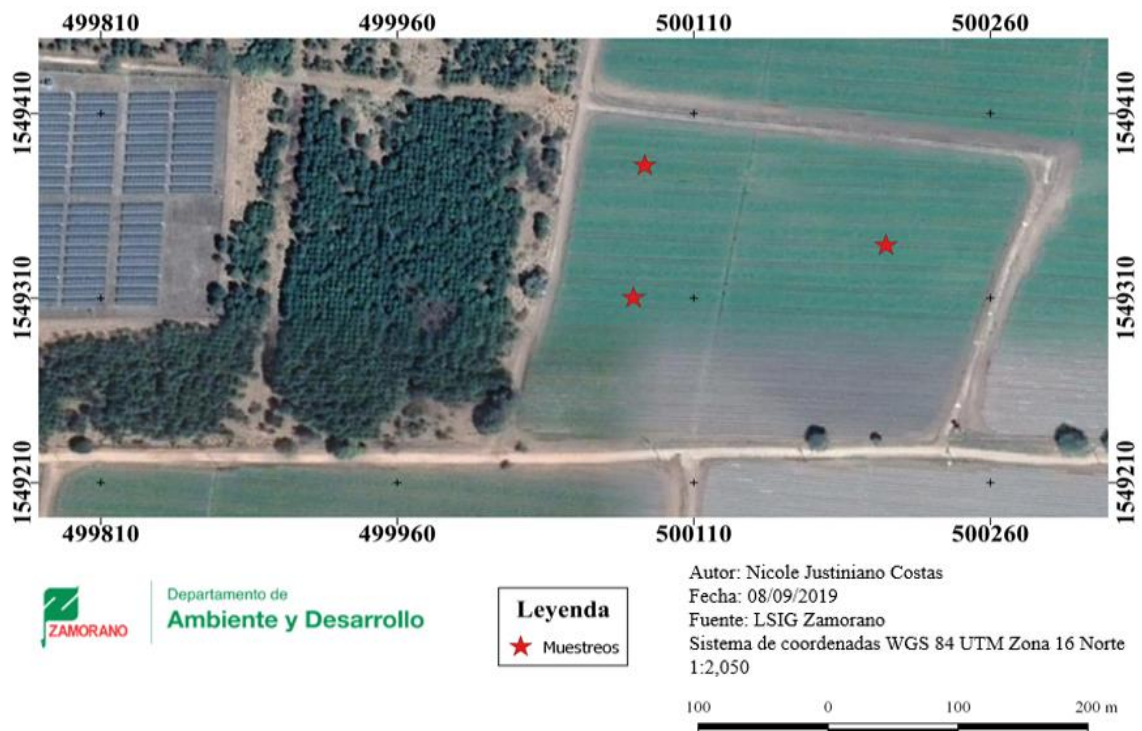


Figura 1. Sitio de recolección de muestras de maíz en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano.

Cuantificación de residuos.

Cuantificación de residuos de maíz y soya. La cuantificación de rastrojos de soya y maíz se realizó durante los meses de abril y agosto respectivamente al concluir la cosecha de ambos cultivos. Se realizó la selección aleatoria de tres parcelas con extensión de una hectárea cada una. Para cada parcela se aplicó un muestreo sistemático en forma de X, cuantificando el rastrojo presente en un área de 1 m², obteniendo un total de 15 muestras para cada cultivo. El material recolectado se introdujo en sacos para registrar el peso húmedo utilizando una balanza de gancho. Los resultados obtenidos se extrapolaron para el cálculo de los kg de materia fresca/hectárea.

Estimación de la generación de estiércol. Para la estimación de estiércol vacuno se realizó una investigación bibliográfica de diferentes tesis y publicaciones donde se reporta la cantidad de estiércol diario y/o productividad por unidad animal. Se consideran diferentes estaciones y métodos de estabulación. La generación de estiércol va a depender del tipo de alimentación, el método de estabulación y la edad del ganado vacuno.

Recolección de sustratos e inóculo para montaje de biorreactores batch.

Recolección de estiércol vacuno. La recolección de estiércol vacuno se realizó en la Unidad de Vaquillas ubicada en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano durante las primeras semanas de mayo. Se recolectó 1 kg de estiércol fresco en el área de alimentación. Luego se colocó en una bolsa plástica con cierre hermético y se trasladó al Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano para su almacenamiento a una temperatura de 4 °C.

Recolección de rastrojos de maíz. La recolección de rastrojos de maíz se realizó en la Finca Agroecológica ubicada en Zamorano, aplicando un muestreo sistemático en la parcela experimental del sitio para obtener un total de cinco muestras. El residuo se colocó en sacos y se trasladó al Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano. Para cada muestra individual se seleccionó una submuestra de 50 gramos para su posterior secado y trituración. Para la implementación de reactores batch se recolectó una submuestra a partir de cada muestra individual.

Recolección de rastrojos de soya. La recolección de rastrojos de soya se realizó en una parcela experimental ubicada en Zona 2 en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano que tiene una extensión de 0.3 hectárea. Se aplicó un muestreo sistemático en X obteniendo un total de cinco muestras colocando en sacos y posterior se trasladó al Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo. Para cada muestra individual se seleccionó una submuestra de 50 gramos para el secado y trituración. Por último, se recolectó una submuestra a partir de cada muestra individual para la implementación de reactores batch.

Recolección de inóculo. La fuente de microorganismos anaerobios, requeridos como inóculo para la puesta en marcha de los reactores batch, se obtuvo del efluente del biodigestor del Módulo de Energía Renovable en Zamorano. Este inóculo fue seleccionado

debido a que el biodigestor opera con estiércol vacuno, sustrato que será utilizado para las mezclas de codigestión en el estudio. El efluente se trasladó al laboratorio para su preservación y almacenamiento en un contenedor de plástico con capacidad de cinco galones mantenido a temperatura ambiente.

Preparación y caracterización de sustratos e inóculo.

Las cinco muestras puntuales de rastrojos de soya y maíz fueron trituradas por separado para posteriormente realizar la caracterización. Se tomó un total tres submuestras por cada muestra puntual, mientras que para el estiércol vacuno y el biol se tomó cuatro submuestras por la muestra puntual para su caracterización. Los sustratos se caracterizaron a partir de análisis de sólidos totales y volátiles (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos realizados para caracterizar los sustratos.

Tipo de muestra	Tipo de sustrato	Parámetro	Método	Referencias
Sólidos y semisólidos	Cultivo de soya, maíz y estiércol vacuno	ST	2540 G	(APHA, 2005)
		SV	2540 G	(APHA, 2005)
Líquido	Biol	ST	2540 B	(APHA, 2005)
		SV	2540 E	(APHA, 2005)

ST: Sólidos Totales.

SV: Sólidos Volátiles.

Para la caracterización de los sustratos de acuerdo con el método utilizado y el tipo de sustrato. Para sustratos sólidos se aplican las siguientes ecuaciones 1 y 2:

$$\text{Sólidos totales (\%)} = \frac{A - B}{(C - B)} \times 100 \quad [1]$$

$$\text{Sólidos volátiles (\%)} = \frac{A - D}{(A - B)} \times 100 \quad [2]$$

Donde:

A = Peso del residuo secado (mg) + Peso del recipiente (mg)

B = Peso del recipiente (mg)

C = Peso de la muestra fresca (mg) + Peso del recipiente (mg)

D = Peso del residuo (mg) + Recipiente después de la ignición (mg)

Para sustratos líquidos se aplican las siguientes ecuaciones 3 y 4:

$$\text{Sólidos totales } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(A - B) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra (mL)}} \quad [3]$$

$$\text{Sólidos volátiles } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(\text{B} - \text{C}) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra (mL)}} \quad [4]$$

Donde:

A = Peso del residuo (mg) + Recipiente antes de la ignición (mg)

B = Peso del residuo (mg) + Recipiente después de la ignición (mg)

C = Peso del recipiente (mg)

Diseño experimental.

Implementación de reactores batch.

Se realizó el montaje de reactores batch para determinar la cantidad de metano producido por cada mezcla de sustratos. Se implementaron 11 tratamientos con seis repeticiones cada uno, para un total de 66 reactores batch operados a una carga orgánica de 1 kg SV/ m³. Cada reactor fue identificado conforme a las proporciones de los kg de SV aportados por cada sustrato en las mezclas de mono digestión y codigestión. Se utilizaron frascos de vidrio con un volumen de 250 mL, conformados por fase líquida y otra fase gaseosa luego del montaje. Para esto, se introducen 100 mL de mezcla del sustrato en agua destilada y 100 mL de inóculo para un total de 200 mL en la fase líquida para cada reactor. El espacio restante equivalente a 50 mL se utilizó para la fase gaseosa del reactor (Angelidaki et al., 2009).

En adición a los reactores, se incluyó un control que contiene 100 mL de biol + 100 mL de agua destilada y un estándar que contiene 100 mL de biol y 0.2 gr de sucrosa disuelto en 100 mL de agua destilada. El propósito de estas pruebas es determinar la viabilidad del inóculo a partir del proceso de digestión anaerobia en presencia de azúcares que en este caso es la sucrosa y el aporte del biol en la producción de metano. Luego del montaje, se aplicó un sello hermético a los reactores con tapones de goma y aluminio. La mezcla se agitó suavemente para mejorar el contacto del sustrato con el inóculo para su posterior incubación a condiciones controladas (35 ± 1 °C) durante 63 días.

Se realizó el montaje de biorreactores para la digestión individual del estiércol vacuno y los residuos agrícolas. Además, se seleccionó las mezclas de codigestión (Cuadro 2) a diferentes proporciones. A partir del contenido de sólidos volátiles (SV) presentes en cada sustrato se dosificará una carga orgánica de 1 mg SV/mL para todos los tratamientos.

Cuadro 2. Diseño experimental con la carga orgánica evaluada con diferentes relaciones de sólidos volátiles.

Carga orgánica de reactores batch	Relación Sólido Volátiles (%)	Repeticiones
Carga 1 kg SV/m ³	100 E	6
	100 S	6
	100 M	6
	70 E - 30 M	6
	50 E - 50 M	6
	30 E - 70 M	6
	70 E - 30 S	6
	50 E - 50 S	6
	30 E - 70 S	6
	Blanco (Biol)	6
	Estándar (Biol + Sucrosa)	6

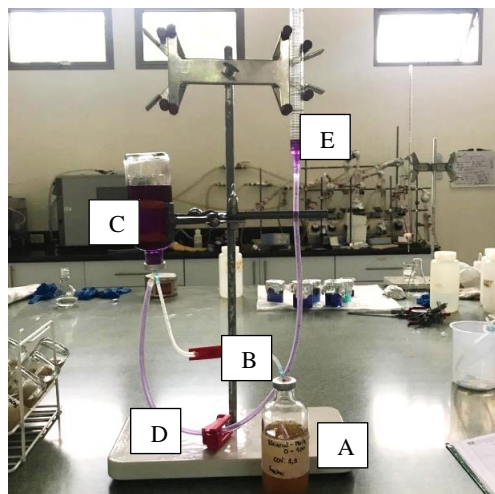
E: Estiércol

M: Rastrojos de maíz

S: Rastrojos de soya

Determinación del índice de producción de metano (IPM).

Se determinó el volumen de metano producido en cada reactor conforme a la metodología descrita por Wilkie, Smith y Bordeaux (2004). La técnica consiste en cuantificar el desplazamiento del volumen de hidróxido de potasio (KOH), equivalente al metano contenido en cada biorreactor que está conectado al sistema a través de una manguera. Al introducir el gas contenido dentro del biorreactor en el frasco con hidróxido de potasio, todos los gases excepto el metano reacciona con el KOH formando carbonatos y sulfatos principalmente (Figura 2).



- A: Reactor Batch
- B: Conexión de paso de gas
- C: Recipiente con solución de KOH.
- D: Conexión del paso de KOH.
- E: Pipeta, medidor de solución de KOH

Figura 2. Cuantificación de CH₄ por volumetría de KOH.

Las mediciones de metano se realizaron cada tres días hasta el agotamiento de la producción de gas, registrando de forma paralela los parámetros de temperatura y presión atmosférica. La medición de acumulación de metano proveniente de estiércol vacuno y residuos agrícolas comenzó al cuarto día de incubación. Las lecturas de metano acumulado se realizaron hasta que la producción en mediciones consecutivas fue menor a 0.5 mL.

Corrección de producción de metano (CH₄). Las lecturas de metano se realizaron hasta que la producción se detuvo alrededor del día 63 y a partir de los datos se determinó el tiempo de retención hidráulica (TRH). Se realizó la corrección de metano a condiciones normales a partir de los valores de temperatura y presión atmosférica. Los valores de temperatura se convirtieron a grados Kelvin y la presión se utilizó en mm Hg. La ecuación 5 es para determinar el volumen de metano corregido en condiciones normales:

$$V_c \text{ (mL)} = \frac{V_{cb} \text{ (mL)} \times P_a \text{ (mm Hg)} \times T_{cn} \text{ (}^\circ\text{C)}}{P_{cn} \text{ (mm Hg)} \times T_a \text{ (}^\circ\text{C)}} \quad [5]$$

Donde:

V_c = Volumen corregido de CH₄ producido en condiciones normales (mL)

V_{cb} = Volumen CH₄ por tratamiento (mL) – Volumen de CH₄ del control (mL)

P_a = Presión atmosférica al momento de la medición (mm Hg)

T_{cn} = Temperatura absoluta en condiciones normales (°C)

P_{cn} = Presión atmosférica absoluta en condiciones normales (mm Hg)

T_a = temperatura atmosférica al momento de la medición (°C)

Cálculo del índice de producción de metano (IPM). Luego de obtener los valores del metano normalizado, se realizó el cálculo del índice de producción de metano (IPM).

$$\text{IPM} \left(\frac{\text{mL CH}_4}{\text{g SV}} \right) = \frac{V_{ma} \text{ (mL)}}{C_o \left(\frac{\text{g SV}}{\text{L}} \right) \times V_s \text{ (L)}} \quad [6]$$

Donde:

IPM = Índice de productividad de metano (mL CH₄/g SV)

V_{ma} = Volumen de metano acumulado (mL)

C_o = Carga orgánica (g SV/L)

V_s = Volumen de solución (L)

Análisis estadístico. Los resultados del índice de productividad de metano (IPM) fueron procesados en el programa InfoStat versión 19. Se comprobaron los supuestos de homocedasticidad, normalidad e independencia a través de los residuales. Posteriormente, se realizó un Análisis de la Varianza (ANDEVA) de una vía para observar las diferencias estadísticas (P < 0.05) entre tratamientos. Seguidamente se aplicó una prueba de LSD-Fisher para separar las medias estadísticas y por último se crearon gráficos de barras para evidenciar las diferencias de los índices de productividad de metano (IPM).

Estimación del potencial energético.

A partir de los resultados obtenidos y su análisis estadístico, se identificó las mejores alternativas de codigestión en la producción de metano. Posteriormente, se calculó la cantidad de metano producido con base a la cantidad de residuo disponible, priorizando la aplicación de la codigestión. Para el cálculo del potencial energético se aplica el valor del poder calorífico de 9,500 kcal/m³ normalizados de metano (Comisión Nacional de Energía, 1999). La conversión energética de metano a electricidad se realizó considerando un generador eléctrico operado con biogás con una eficiencia de 33%. Además, se consideró el contenido de sólidos totales y sólidos volátiles de cada sustrato para realizar los cálculos de la mezcla de codigestión.

La siguiente ecuación es para obtener el metano diario:

$$MD = RT \times COVD \quad [7]$$

Donde:

MD = Metano diario esperado (m³)

COVD = Carga orgánica diaria (kg SV/ día)

RT = Rendimiento en cada tratamiento (m³ CH₄/ kg SV)

Luego con el valor obtenido del poder calorífico se estimó el potencial energético con la siguiente ecuación:

$$E = MD \times PC \quad [8]$$

Donde:

E = Energía (kcal)

MD = Metano diario esperado (m³)

PC = Poder calorífico (kcal/ m³)

La ecuación 9 es considerando un generador eléctrico operado con biogás con una eficiencia de 33%:

$$ET = E \times \epsilon \times FC \quad [9]$$

Donde:

ET = Energía Total (MWh)

E = Energía (kcal)

ϵ = Eficiencia del generador eléctrico (33%)

FC = Factor de conversión de kcal a MWh (1.16×10^{-6})

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de residuos de maíz y soya.

La cuantificación de rastrojos de soya se realizó en el departamento de Santa Cruz de la Sierra mientras que los rastrojos de maíz se determinaron en dos sitios diferentes dentro de Zamorano. A continuación, se presentan los resultados de rastrojos de soya y maíz por hectárea (Cuadro 3).

Cuadro 3. Cuantificación de rastrojos de soya y maíz.

	Sitio	# Hectárea	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Promedio (kg/m ²)
Rastrojo de soya	Departamen to de Santa Cruz	1	1.8	1.6	1.2	1.3	1.3	1.16
		2	1.1	0.6	1.1	0.7	1.4	
		3	1.2	0.7	1.3	0.8	1.3	
Rastrojo de maíz	Zona 1	1	1.4	1.4	2.4	1.4	1.4	1.72
		2	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	
		3	1.3	1.4	1.5	2.2	3.7	

La producción de soya tiene una densidad de siembra de 300,000 plantas por hectárea mientras que los rastrojos de maíz tienen una densidad de siembra de 77,000 plantas por hectárea. Al proyectar los datos de la cuantificación de rastrojos de soya y maíz se obtuvo que la cantidad de materia fresca por hectárea fue de 11.6 y 17.2 Ton/ha respectivamente. Galarza y colaboradores (2011) reportaron un total de 8 Ton/ha de rastrojos de soya sin la aplicación de fertilizantes. El mismo estudio reportó un total de 7 Ton/ha de rastrojos de maíz sin la aplicación de fertilizantes, incrementando hasta obtener 11.11 Ton/ha de rastrojos al aplicar una fertilización convencional.

Otro estudio midió el tiempo que tarda el rastrojo en degradarse, concluyendo que los rendimientos de materia seca de los tallos, las hojas y cascara disminuyeron a partir del día 118. La fracción de la hoja sufrió pérdidas más rápidas y mayores a comparación de la fracción de los tallos y cáscara. Al final del estudio, 213 días después de la siembra, las hojas habían perdido el 74% de la materia seca mientras que la fracción de cáscara y tallo fueron de 54 y 38% respectivamente (Pordesimo et al., 2004).

Como se mencionó anteriormente la disponibilidad de residuos es una limitante en el estudio debido a que en cada país las épocas de producción son diferentes. La obtención de residuos de soya en Bolivia es a partir del mes de marzo cuando finaliza la cosecha y el otro mes que se obtiene residuos es a partir de septiembre. La disponibilidad de residuos de maíz en Zamorano es a partir de octubre y enero.

El cuadro 4 presenta la generación de residuos por hectárea y las características de los rastrojos de soya y maíz reportadas por diferentes autores. Se incluyen las características obtenidas en diversos estudios para los ensayos de sólidos totales, sólidos volátiles y relación de carbono/nitrógeno (C/N).

Cuadro 4. Caracterización de rastrojos de maíz y soya por diversos autores.

Residuo	Indicador	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Relación C/N	Referencia
	-	94.70 ± 0.3	88.00 ± 0.8	67.6 ± 0.0	(Zhu, Wan, Li, 2010)
	-	93.99 ± 1.7	87.44 ± 1.3		(Zhong et al., 2011)
	-	92.60 ± 1.7	89.70 ± 1.3	59	(Li et al., 2009)
Rastrojos de maíz	7.00 Ton/ha	-	-	-	(Galarza et al., 2011)
	5.20 Ton/ha	-	-	-	(Luo, Van Der Voet y Huppés, 2009)
	11.52 Ton/ha	-	-	-	(Pordesimo et al., 2004)
Rastrojos de soya	8.00 Ton/ha	-	-	-	(Galarza et al., 2011)

La degradación de rastrojos en el suelo depende de factores como humedad, temperatura y su disponibilidad de nutrientes (Hubbard y Jordan, 1996). Así mismo, la relación de C/N está relacionada con la velocidad de descomposición de los residuos indicando que a menor relación de C/N mayor es la velocidad de descomposición. De acuerdo con Ernst, Bentancur y Borges (2001) la descomposición de residuos de soya es más rápida que los residuos de maíz, debido a la relación de C/N y tiene un menor contenido de compuestos lignocelulósicos (Marcos y Karina, 2000).

Estimación de la generación de estiércol vacuno.

La generación y características del estiércol dependen de factores como el tipo de dieta, el consumo de agua, el peso del animal y sistema de la ganadería (Amo et al., 2006). A continuación, se presenta la recopilación de diferentes indicadores de la producción de estiércol para ganado vacuno, así como la proporción sólidos totales y volátiles obtenidas en diferentes estudios.

Cuadro 5. Caracterización de estiércol vacuno por diversos autores.

Residuo	Indicador	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Relación C/N	Referencia
Estiércol	-	6.73	84.7	-	(Zarkadas, 2015)
	-	6.4	80.6	-	(Normak, 2011)
	-	17.1 ± 0.6	84.3 ± 1.2	6	(Li et al., 2009)
	-	20.0 ± 0.4	83.0 ± 0.19	-	(Kavack, 2011)
	13.8 kg/vaca/día	20.65	76.89	7.5	(Carlin, 2015)
	8 kg/100 kg de peso animal	-	-	-	(Herrero, 2008)
	45 kg/vaca/día	-	-	-	(Aguilar, 2003)

La diferencia entre los estudios de Carlin y Aguilar se debe al sistema de ganadería, siendo para el primer caso un sistema semi-estabulado y para el segundo una recolección total del estiércol por estabulación permanente. Las bajas concentraciones de ST obtenidas por Zarkadas y Normak se deben a metodologías de manejo de estiércol, que involucran el uso de agua para su transporte a tanques de almacenamiento y por lo tanto su incremento en humedad. Los datos reportados de los diferentes autores coinciden en las concentraciones de sólidos volátiles. En el caso de Bolivia es un sistema estabulado que recolecta la totalidad del estiércol, mientras que en Zamorano es un sistema semi-estabulado recolectando parcialmente el estiércol.

Caracterización de sustratos.

Para determinar el potencial energético de residuos a partir de la producción de biogás, se realizó la caracterización preliminar que implica la cuantificación de materia orgánica presente en cada sustrato. El valor promedio de los resultados obtenidos se incluye en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados de la caracterización de estiércol vacuno, rastrojos de maíz y soya.

Residuo	Sitio	Sólidos Totales (%)	Sólidos volátiles (%)
Estiércol	Unidad de Vaquillas	27.19	77.43
Rastrojos de maíz	Finca Agroecológica	94.34	91.17
Rastrojos de soya	Depto. Santa Cruz de la sierra	-	-
	Zona 2	93.98	88.39

Al comparar los resultados obtenidos para la muestra de estiércol con los reportados por Carlin (2015), se obtuvo una menor humedad debido que el estiércol fue recolectado en la Unidad de Ganado Lechero dentro de los pasillos de alimentación y sala de ordeño donde existe la aplicación de agua para limpieza. Sin embargo, se hace notar que no hay variación de los valores obtenidos para proporción de SV/ST.

Los resultados de rastrosos son congruentes con otros estudios reportados en el Cuadro 4, los valores de ST denotan que se los rastrosos recolectaron en temporada seca. Asimismo, la proporción de SV, que representa la cantidad de materia orgánica que tiene el potencial de degradarse, fue superior a lo obtenido por el estiércol, indicando que la mayor proporción de sólidos presentes en los sustratos son de carácter orgánico.

Cuantificación de producción de metano en reactores batch.

A partir de los datos obtenidos durante el ensayo de cuantificación de metano, se obtiene información asociada al tiempo requerido para la degradación, los periodos de mayor productividad de metano, el periodo de descenso para la producción de metano y posibles variaciones asociadas a la composición fisicoquímica del sustrato. Para el análisis de los datos obtenidos se presenta de forma separada las curvas de generación de metano para los tratamientos de monodigestion y codigestión.

A partir de los datos obtenidos para la producción de metano en los tratamientos de monodigestion, se obtiene el patrón en el comportamiento de los sustratos durante el proceso de digestión anaerobia (Figura 3). El pico en la producción de metano se registra en el día 12, comenzando a decaer a partir del día 15. Durante los primeros 24 días se verifica la degradación de compuestos como almidones y azúcares que son de fácil descomposición para la población de microorganismos presentes. En el día 27 se registra otro pico de producción y uno de menor tamaño en el día 39. El comportamiento de los picos se debe a la degradación de carbohidratos más complejos como el material lignocelulósico que están presentes en menor proporción en los sustratos seleccionados.

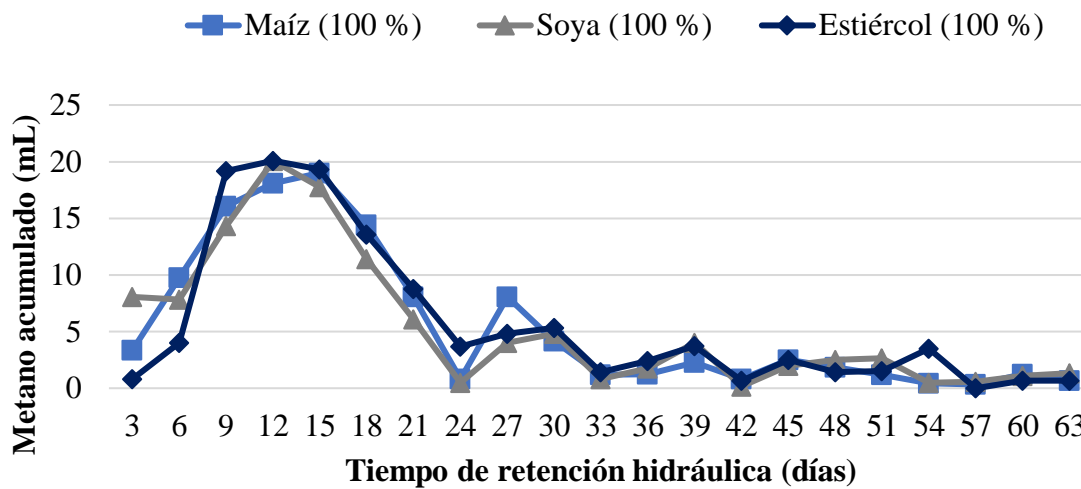


Figura 3. Producción diaria de CH₄ para los tratamientos de digestión.

Para el tratamiento de codigestión de estiércol en combinación con soya se registró un pico de producción de metano en el día 15 y a partir del día 24 la producción comienza a decaer (Figura 4). Los tratamientos alcanzan el 85% de la producción de metano en el día 30 y este valor debe ser considerado al momento de dimensionar el volumen de un biodigestor. Además, en el tratamiento de E30:S70 se observan picos de producción de metano más bajo que el resto esto se debe a la composición de los rastrojos de soya. Los resultados obtenidos por Xu y sus colaboradores (2007) reportaron una composición de 24.99% de celulosa, 11.91% de hemicelulosa y 17.64% de lignina.

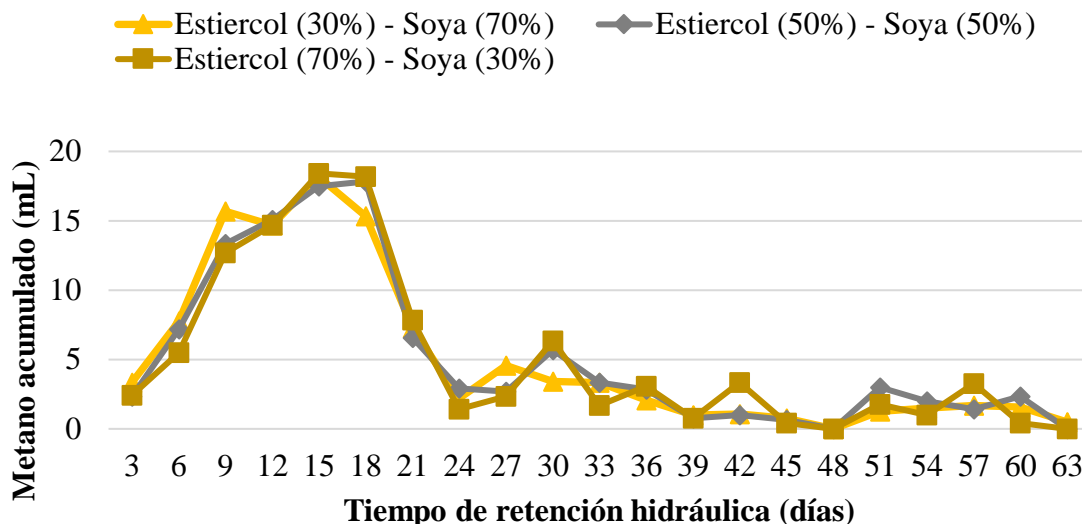


Figura 4. Producción diaria de CH₄ para los tratamientos de codigestión de residuos de soya.

Para los tratamientos de codigestión de estiércol y maíz se registra un pico más alto para E70:M30 en el día 12 y luego decae la producción en el día 24. Mientras que para los tratamientos de E30:M70 y E50:M50 se observó en el día 15 decayendo la producción en el día 24. Es evidente que los picos más resaltados en la Figura 6 son en el tratamiento de E30:M70 debido a una mayor proporción de los rastrojos de maíz. De acuerdo con Zhong y colaboradores (2011) este residuo está compuesto por 41.16 de celulosa y 8.72% de lignina. La producción de metano alcanza el 85% en el día 30 para el tratamiento E70:M30, al igual que el tratamiento de estiércol que alcanza este valor al día 30 mostrando el efecto de la predominancia en la proporción de estiércol.

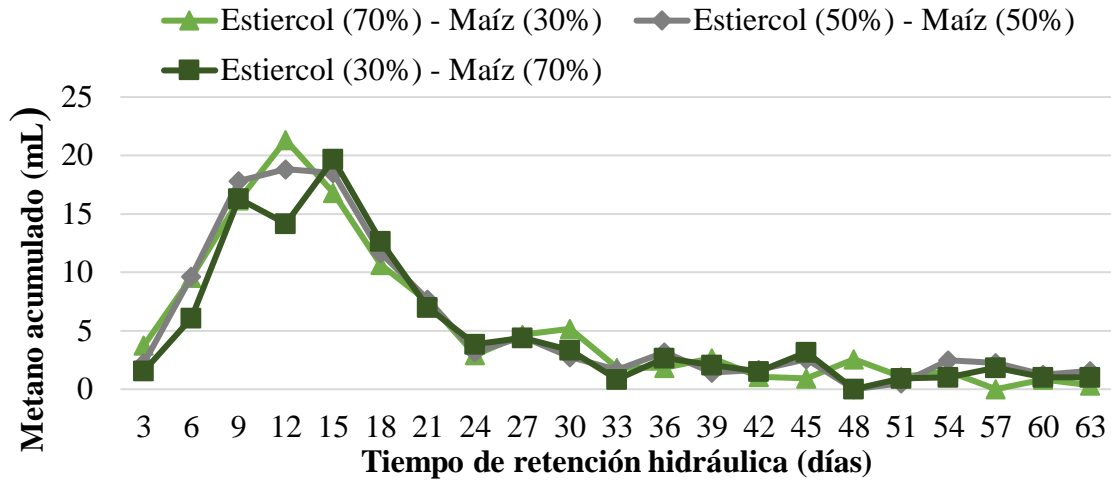


Figura 5. Producción diaria de CH₄ para los tratamientos de codigestión de residuos de maíz.

El desempeño en la codigestión de estiércol y soja está influenciado por la relación C/N baja en ambos residuos. La principal fuente de alimentación de las bacterias son el carbono y el nitrógeno, el carbono es una fuente de energía y el nitrógeno ayuda a la formación de nuevas células. El rastrojo de soja como estiércol tienen valores de C/N menores a 25 que es el óptimo para biogás, por lo tanto, al mezclar ambos sustratos puede incrementar la generación de compuestos inhibidores como el amonio.

Determinación del índice de producción de metano (IPM).

A partir de la producción acumulada de metano normalizada se calculó el (IPM). Los resultados señalan un mayor IPM se obtiene en los tratamientos de monodigestión (Cuadro 7). El mayor índice de producción de metano (IPM) se registró para el tratamiento de E100 con un IPM de 0.3024 m³ CH₄/kg SV. El mejor escenario para codigestión es la combinación de E70:M30 con un IPM de 0.2879 m³ CH₄/kg SV.

Cuadro 7. Comparación de índice de producción de metano por cada tratamiento.

Carga orgánica (kg SV/m ³)	Nombre del tratamiento	Índice de Producción de Metano (m ³ CH ₄ /kg SV)
1	M100	0.2964
	S100	0.2811
	E100	0.3024
	E30:M70	0.2381
	E50:M50	0.2749
	E70:M30	0.2879
	E30:S70	0.2604
	E50:S50	0.2537
	E70:S30	0.2453

Para los resultados obtenidos en codigestión se observa que el mejor tratamiento es E70:M30 maíz. El tratamiento con menor IPM es el E30:M70 con un índice de producción de metano de 0.2381 m³ CH₄/kg SV. En la Figura 6 se observa que al aumentar la proporción de estiércol vacuno existe una mayor producción de metano en los escenarios de codigestión.

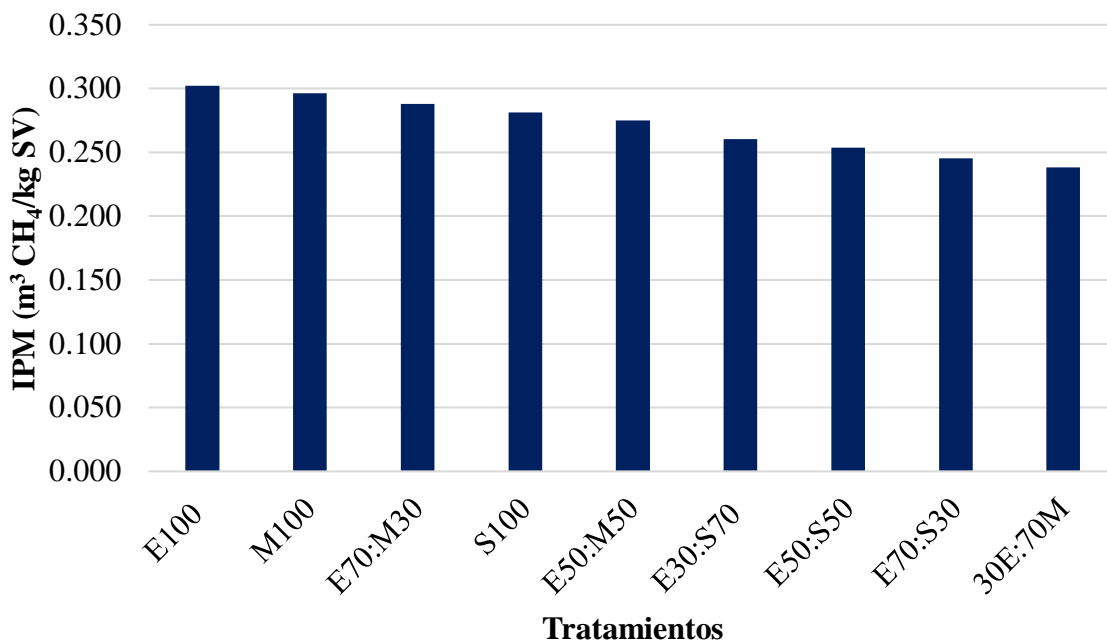


Figura 6. Índice de producción de metano por cada tratamiento.

Los valores del índice de productividad de metano tienen una distribución normal y son homocedásticos (igualdad de varianza). Al realizar el análisis de varianza (ANDEVA), se encontró que existen diferencias significativas entre los tratamientos, ya que obtuvo una probabilidad de 0.0089, siendo menor al riesgo establecido (Alpha = 0.05). Como resultado se obtuvo un coeficiente de variación de 11.86%, lo que indica que está dentro de los rangos permitidos de control del experimento (Cuadro 8).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio, la monodigestion de estiércol y maíz es apto para la producción de metano. La producción de metano del tratamiento de E100 fue de 0.3024 m³ CH₄/kg SV, superior a lo reportado por Carlin (2015) con un valor de 0.28 m³ CH₄/kg SV. Al mismo tiempo los resultados obtenidos por Xavier, Moset, Wahid y Møller (2005) reportan un IPM de 0.306 m³ CH₄/kg SV similar obtenido en el estudio. Del mismo modo para los rastrojos de maíz, Ventura (2014) reporta un IPM de 0.288 m³ CH₄/kg SV comparable al valor de 0.2964 m³ CH₄/kg SV obtenido en esta investigación.

Cuadro 8. Prueba de análisis de varianza (ANDEVA).

Fuente de variación	Grados de libertad	Valor F	Valor de probabilidad	Coefficiente de Variación
Tratamientos	8	2.99	0.0089	11.86
Error	45			
Total	53			

El mejor tratamiento reportado es E100 ya que estadísticamente es diferente con respecto con E30:S70, E50:S50, E70:S30 y E30:M70 (Cuadro 9). Por último, la menor producción de metano se obtuvo en el tratamiento E30:M70 con una media de 0.24. En los tratamientos E100 y E30:M70 demostraron diferentes significativas entre sí. La precisión de la estimación del modelo fue muy buena conforme al valor del error estándar residual (EE = 0.01).

Cuadro 9. Diferencia de medias en los diferentes tratamientos.

Nombre de tratamiento	Medias	Número de muestras	Error Estándar	Diferencia Mínima Significativa de Fisher
E100	0.30	6	0.01	A
M100	0.30	6	0.01	AB
E70:30M	0.29	6	0.01	ABC
S100	0.28	6	0.01	ABCD
E50:M50	0.27	6	0.01	ABCDE
E30:S70	0.26	6	0.01	BCDE
E50:S50	0.25	6	0.01	CDE
E70:S30	0.25	6	0.01	DE
E30:M70	0.24	6	0.01	E

E: Estiércol

M: Rastrojos de maíz

S: Rastrojos de soya

Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($P < 0.05$)

La Figura 7 presenta el índice de productividad de metano para los tratamientos de digestión y codigestión anaerobia. El mayor índice de productividad de metano estadísticamente fue el E100 con un IPM $0.3024 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ y la menor productividad de metano fue el E30:M70 con un IPM de $0.2381 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Los tratamientos que tienen una producción de metano bajo es debido a que los microorganismos no degradaron fácilmente los compuestos complejos. También está relacionado con la carencia de nutrientes presentes en el reactor debido a la limitación de alimento para los microorganismos. Al mismo tiempo el incremento en la concentración de nitrógeno favorece la producción de compuestos inhibidores para los microorganismos.

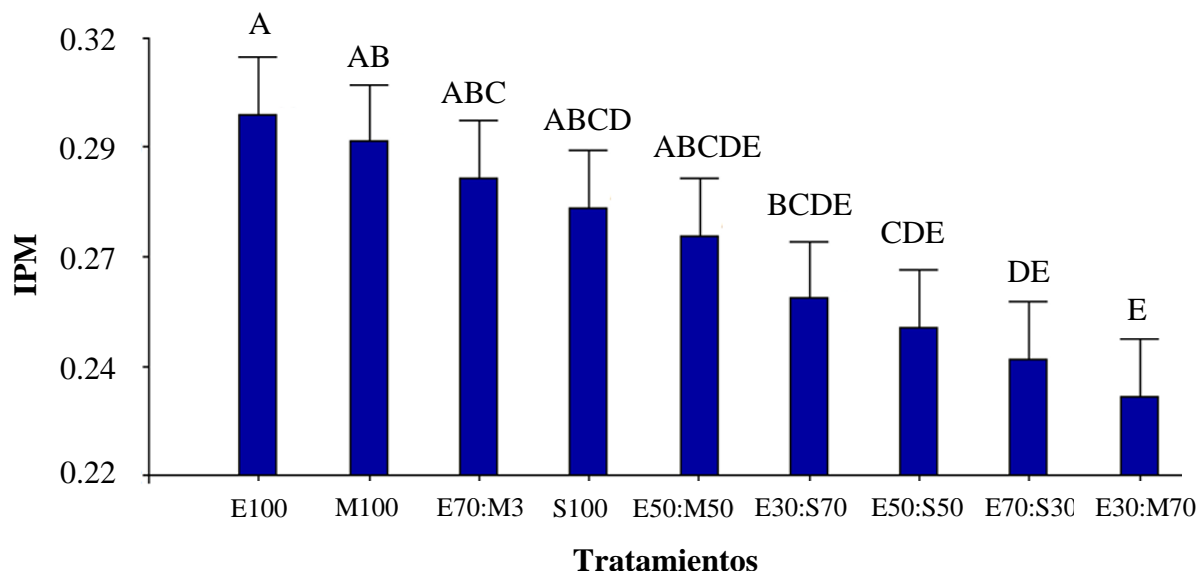


Figura 7. Índice de productividad de metano para los tratamientos analizados.

Estimación del potencial energético.

De acuerdo con los resultados obtenidos se seleccionaron los mejores tratamientos de codigestión. El primer escenario se planteó para la Universidad Zamorano, planificando la operación del biodigestor a partir de los tratamientos de E70:M30 y E100, estimando la operación por 6 meses para cada uno conforme a la disponibilidad de residuo. Se consideró la Unidad de Ganado Lechero que cuenta con un total de 300 vacas y una tasa de excreción promedio de 13.8 kg estiércol diario por vaca manteniendo un sistema semi-estabulado. Al mismo tiempo se consideró la Unidad de Granos y Semillas que cuenta con una producción de maíz de 29 hectáreas generando un promedio de 11.6 toneladas por hectárea.

La producción de maíz cuenta con dos ciclos que son de mayo a agosto y de septiembre a diciembre. La disponibilidad de estiércol fresco es de 745.2 toneladas y un total de 997 toneladas de rastrojos de maíz anual para la operación del biodigestor. Se requiere un total de 78.10 toneladas de rastrojos de maíz fresco y 745.2 toneladas de estiércol fresco para la operación de 6 meses en codigestión. Mientras que el resto de los meses se opera con un total de 745.2 toneladas de estiércol fresco y un ingreso al biodigestor de 156.89 toneladas de SV de estiércol. En el Cuadro 10 se observa el potencial energético total de un año que es de 407.09 MWh.

Cuadro 10. Potencial energético de la biomasa para el escenario de Zamorano.

Tratamiento	E100	E70:M30
IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)	0.3024	0.2879
Disponibilidad de estiércol (Ton)	745.2	745.2
Disponibilidad de residuos de maíz (Ton)	-	997.6
Materia fresca necesaria de estiércol (Ton)	745.2	745.20
Materia fresca necesaria de R. maíz (Ton)	-	78.10
Ton por SV de estiércol	156.89	156.89
Ton por SV de residuos de maíz	-	67.24
Producción m ³ CH ₄	47,443.10	64,526.03
Energía eléctrica (MWh)	172.49	234.60

El segundo escenario es el tratamiento de codigestión de E30:S70 y E100 que es para una finca ubicada en el Departamento de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia (Cuadro 11). Se consideró el sitio debido a la disponibilidad de residuos de soya contando una extensión de 5,000 hectáreas. Para la operación del biodigestor se requiere un total 32,400 toneladas de materia fresca de estiércol y un total 19,160.3 toneladas de residuos de soya anualmente. El potencial energético de la mezcla es de 29,024.2 MWh al año.

Cuadro 11. Potencial energético de la biomasa para el escenario de Bolivia.

Tratamiento	E100	E30:S70
IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)	0.3024	0.2604
Disponibilidad de estiércol (Ton)	32,400.0	32,400.0
Disponibilidad de residuos de soya (Ton)	-	58,000.0
Materia fresca necesaria de estiércol (Ton)	32,400.0	32,400.0
Materia fresca necesaria de R. soya (Ton)	-	19,160.3
Ton por SV de estiércol	6,821.2	6,821.2
Ton por SV de residuos de soya	-	15,916.2
Producción m ³ CH ₄	2,062,061.5	5,920,838.32
Energía eléctrica (MWh)	7,497.2	21,527.0

4. CONCLUSIONES

- La cuantificación de residuos de soya y maíz fue de 11.6 y 17.2 Ton/ha respectivamente. Ambos rastrojos son de carácter estacional y para su integración en un sistema energético de operación continua la codigestión con sustratos de disponibilidad permanente como el estiércol representa una alternativa para su aprovechamiento.
- El mejor tratamiento en la codigestión fue estiércol y maíz en una proporción de 70:30 reportando un IPM de 0.2879 m³ CH₄/kg SV. Al aumentar la proporción de estiércol vacuno incrementa el índice de producción de metano. El aprovechamiento de estos residuos tiene el potencial de generar 407.09 MWh por año conforme a disponibilidad de residuos en Zamorano.
- El tratamiento con mayor IPM en la codigestión de estiércol y residuos de soya es la proporción de 30:70, lo que denota que a diferencia de la codigestión con rastrojos de maíz, al aumentar la proporción de residuos de soya existe un incremento en la producción de metano.
- La alternativa más viable de aprovechamiento energético para Bolivia corresponde al segundo escenario con una proporción de residuos de E30:S70. La disponibilidad de los rastrojos de soya y el estiércol vacuno en Bolivia pueden ser aprovechados para una generación de electricidad de 29,024.2 MWh por año.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar futuras investigaciones haciendo énfasis en la proporción de nutrientes y el contenido de compuestos| lignocelulósicos.
- Identificar otros residuos agrícolas que logren potenciar la productividad de metano en combinación con estiércol vacuno.
- Realizar un estudio comparativo de dos escenarios; uno en la incorporación de rastrojos de maíz y soya en el suelo y otro incorporando el efluente de un biodigestor en condiciones anaerobias (biol) en el suelo.
- Realizar la aplicación de tratamientos químicos para mejorar la degradabilidad de los cultivos debido a su alto contenido de compuestos complejos como la lignina.
- Ampliar el inventario existente de residuos orgánicos en Zamorano, en especial los cultivos como maíz, soya, frijol y sorgo que son estacionales.

6. LITERATURA CITADA

- Aguilar, F., y Enrique, E. (2003). Problemática, uso y manejo del estiércol de ganado bovino lechero. Tesis Ing. Agr., Juan Carlos Fernando Aguilar, México, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. 66 p.
- American Public Health Association (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC, EEUU.
- Amon, T., Hackl, E., Jeremic, D., y Amon, B. (2002). Kofermentation vos wirtschaftsüngern mit energiegräsern om landwirtschaftlichen biogasanlagen, optimierung der gärgutmischungen und des biogasertrages. Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik. Universität für Bodenkultur Wien.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Bodiroza, V., Pötsch, E., y Zollitsch, W. (2006). Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. International Congress Series, 1293, 217–220.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J. , . . . van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 59(5), 927–934.
- Astals, S., Ariso, M., Galí, A., y Mata-Alvarez, J. (2011). Co-digestion of pig manure and glycerine: Experimental and modelling study. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1091–1096.
- Carlin, R. (2015). Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno. (Tesis de Pregrado). Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 37 p.
- Ernst, O., Bentancur, O., y Borges, R (2002). Descomposición de rastrojo de cultivos en siembra sin laboreo: trigo, maíz, soja y trigo después de maíz o de soja. *Agrociencia*, 6(1), 20-26.
- Food and agriculture organization of the united nations (1996). *Biogas technology: a training manual for extension*. Karthmandú, Nepal.
- Galarza, C., Vallone, P., Gudelj, V., Cazorla, C., y Baigorria, T. (2011). Caracterización de rastrojos en sistemas agrícolas estabilizados. Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 7 p.

- Helguero, A., Bustillos, L., y Hernani, J. (2018). Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. *Revista Estudiantil AGRO – VET*, 2(2), 185-191.
- Herrero, J. M. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación.
- Hubbard, V. C., y Jordan, D. (1996). Nitrogen recovery by corn from nitrogen-15 labeled wheat residues and intact roots and soil. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1405-1410.
- Kamilaris, A., Anton, A., Blasi, A. B., y Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Assessing and mitigating the impact of livestock agriculture on the environment through geospatial and big data analysis. *Sustainable Agricultural Management and Informatics*, 4(2), 98-122.
- Kavacik, B., y Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1321–1329.
- Li, X., Li, L., Zheng, M., Fu, G., y Lar, J. S. (2009). Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure with Corn Stover Pretreated by Sodium Hydroxide for Efficient Biogas Production. *Energy & Fuels*, 23(9), 4635–4639.
- Luo, L., van der Voet, E., y Huppés, G. (2009). An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock–Corn stover. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2003–2011.
- Marcos, B., y Karina, C. (2000). Descomposición de residuos de cultivos de verano.
- Normak, A., Suurpere, J., Orupõld, K., Jõgi, E., y Kokin, E. (2012). Simulation of anaerobic digestion of cattle manure. *Biosystem Engineering*. 10, 167–174.
- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., La Rubia, T. de, y Martínez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: *An overview. International Microbiology: the Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, 5(2), 53–63.
- Pordesimo, L. O., Edens, W. C., y Sokhansanj, S. (2004). Distribution of aboveground biomass in corn stover. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 337–343.
- Warnars, L., y Oppenoorth, H. (2014). El biol: el fertilizante supremo: Estudio sobre el biol, sus usos y resultados. 23 p.
- Wilkie, A. C., Smith, P.H., y Bordeaux, F.M. (2004). An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource technology*, 92(1), 103–109.
- Ventura, C. (2014). Productividad de metano a partir de residuos de cultivo de maíz y frijol. (Tesis de Pregrado). Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 36 p.
- Xavier, C. A.N., Moset, V., Wahid, R., y Møller, H. B. (2015). The efficiency of shredded and briquetted wheat straw in anaerobic co-digestion with dairy cattle manure. *Biosystems Engineering*, 139, 16–24.
- Xu, Z., Wang, Q., Jiang, Z., Yang, X. X., y Ji, Y. (2007). Enzymatic hydrolysis of pretreated soybean straw. *Biomass and Bioenergy*, 31(2-3), 162-167.

- Yepez, L. (2017). Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano. (Tesis de Pregrado). Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 36 p.
- Zarkadas, I. S., Sofikiti, A. S., Voudrias, E. A., y Pilidis, G. A. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of pasteurised food wastes and dairy cattle manure in batch and large volume laboratory digesters: Focussing on mixing ratios. *Renewable Energy*, 80, 432–440.
- Zhong, W., Zhang, Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., y Xiao, M. (2011). Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresource Technology*, 102(24), 11177–11182.
- Zhu, J., Wan, C., & Li, Y. (2010). Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. *Bioresource Technology*, 101(19), 7523–7528.

7. ANEXOS

Anexo 1. Cuantificación de rastrojos de soya en Bolivia.



Anexo 2. Cuantificación de rastrojos de maíz en Zona 1.



Anexo 3. Reactores del tratamiento de digestión y codigestión anaerobia.



Anexo 4. Incubación de reactores batch.



Anexo 5. Disponibilidad de rastrojos de soya y maíz en diferentes países.

Cultivo	País	Época de siembra	Meses
Rastrojos de soya	Bolivia	Primera	Noviembre - Marzo
		Postrera	Mayo - Septiembre
	Argentina - Bolivia - Brasil - Paraguay - Uruguay	Primera	Octubre - Abril
	Argentina - Uruguay	Segunda	Diciembre - Mayo
	Brasil - Paraguay	Postrera	Febrero - Junio
Rastrojos de maíz	Bolivia	Primera	Febrero- Junio
		Postrera	Octubre - Febrero
	Brasil	Primera	Febrero- Junio
		Postrera	
	El Salvador	Primera	Mayo - Octubre
		Postrera	Agosto - Enero
	Honduras	Primera	Mayo - Octubre
		Postrera	Septiembre - Enero
	Guatemala	Primera	Marzo - Agosto
		Postrera	Abril - Septiembre
Nicaragua	Primera	Mayo - Octubre	
	Postrera	Agosto - Enero	