

## Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos

### Anaerobic co digestion from cattle, pig manure and horse manure as an alternative to improve the energetical potential in household digesters

### Co-digestão anaeróbia de estenos de bovinos, porcino e equinos como alternativa para melhorar o potencial energético dos digestores domésticos

Liliana del Pilar Castro-Molano\*; Yilber Alexander Parrales-Ramírez; Humberto Escalante-Hernández

Grupo de Investigación en Tecnologías de Valorización de Residuos y Fuentes Agrícolas e Industriales para la Sustentabilidad Energética (INTERFASE), Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Carrera 27, Calle 9 Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia

\*licasmol@uis.edu.co

Fecha recepción: 14 de octubre de 2019

Fecha aceptación: 19 de noviembre de 2019

#### Resumen

Los digestores domésticos han sido utilizados para la gestión y valorización energética de estiércoles, en procesos de mono-digestión anaerobia. Sin embargo, el conocimiento es limitado con respecto a los rendimientos de biogás a partir de la co digestión de estiércoles. En este sentido, el objetivo de esta investigación fue determinar, mediante un diseño experimental usando la sinergia ( $\Phi$ ) como un indicador, las relaciones de mezcla adecuadas para digestión anaerobia de estiércoles, contribuyendo a obtener un mejor aprovechamiento tanto del digester como de los residuos. En esta investigación se realizó un estudio de mezclas de diluciones de estiércol bovino, equino y porcino teniendo en cuenta como variables de respuesta el potencial de biometanización (PBM) y la sinergia ( $\Phi$ ). Los resultados demostraron que en el proceso de mono-digestión, en orden ascendente, los potenciales de biometanización fueron 10,44 N l CH<sub>4</sub>/kgSV; 14,50 N l CH<sub>4</sub>/kgSV; y 17,09 N l CH<sub>4</sub>/kgSV para el estiércol bovino, porcino y equino respectivamente. La mezcla de estiércoles (binarias y ternarias), presentaron sinergias >1, y en consecuencia se obtuvieron mejores potenciales de biometanización. La mayor sinergia (3,63), la presentó la mezcla estiércol equino-bovino en proporción 35,5:64,5 (%p) respectivamente. A partir del potencial energético, los usuarios de los biodigestores domésticos podrán disponer de diferentes escenarios de codigestión de mezclas de estiércoles, para un mejor rendimiento en la producción de biogás.

**Palabras clave:** Estiércoles; Potencial de Biometanización; Relación de Mezcla; Sinergia.

#### Abstract

Domestic digesters have been used for the management and energy recovery of manures in anaerobic mono-digestion processes. However, knowledge regarding biogas yields from the co-digestion of manure is limited. Therefore, by means of an experimental design using synergy ( $\Phi$ ) as an indicator, this research aims at determining the appropriate mixing ratios for anaerobic digestion of manure, contributing to the obtainment of a better use of both the digester and the waste. In this research, a study was conducted on

mixtures of dilutions of bovine, equine and pig manure, taking into account as response variables potential for biomethanization (BMP) and synergy ( $\Phi$ ). The results showed that in the mono-digestion process, in ascending order, the biomethanization potentials were 10.44 NI CH<sub>4</sub>/kgVS; 14.50 NI CH<sub>4</sub>/kgVS; and 17.09 NI CH<sub>4</sub>/kgVS for bovine, porcine and equine manure respectively. The mixture of manures (binary and ternary), presented synergies  $\Phi > 1$ , and consequently better biomethanization potentials were obtained. The greatest synergy (3.63) was presented by the equine-bovine manure mixture in a proportion 35.5: 64.5 (% w) respectively. Based on the energy potential, users of domestic biodigesters will be able to have different co-digestion scenarios for manure mixtures, for a better yield in biogas production.

**Keywords:** *Biomethane Potential; Manures; Mixture.*

## Resumo

Os digestores domésticos têm sido utilizados para a gestão e recuperação de energia de esterco em processos de digestão anaeróbica. No entanto, o conhecimento é limitado em relação à produção de biogás proveniente da co-digestão do esterco. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi determinar por meio de um delineamento experimental utilizando a sinergia ( $\Phi$ ) como indicador, as proporções adequadas de mistura para a digestão anaeróbica do esterco, contribuindo para a melhor utilização do digestor e do resíduo. Nesta pesquisa, foi realizado um estudo sobre misturas de diluições de esterco bovino, equino e suíno, considerando as variáveis de resposta do potencial de biometanização (PBM) e sinergia ( $\Phi$ ). Os resultados mostraram que no processo de monodigestão, em ordem crescente, os potenciais de biometanização foram 10,44 NI CH<sub>4</sub>/kgSV; 14,50 NI de CH<sub>4</sub>/kgSV; e 17,09 NI CH<sub>4</sub>/kgSV para esterco bovino, suíno e equino, respectivamente. A mistura de esterco (binários e ternários) apresentou sinergias  $\Phi > 1$  e, conseqüentemente, foram obtidos melhores potenciais de biometanização. A maior sinergia (3,63) foi apresentada pela mistura de esterco bovino equino em uma proporção de 35,5: 64,5 (% p), respectivamente. Com base no potencial energético, os usuários de biodigestores domésticos podem ter diferentes cenários de co-digestão de misturas de esterco, para melhor rendimento na produção de biogás.

**Palavras-chave:** *Potencial de Biometano; Estrume; Mistura.*

## Introducción

El Instituto Colombiano de Agricultura - ICA reportó que en Colombia para el año 2017 había 23,5 millones de cabezas de bovino, 1,4 millones de equinos y 5,3 millones de porcinos, presentando un aumento de 3,5%, 1,25% y 4,6% respectivamente en su población comparada con el año anterior [1]. El desarrollo de esta actividad pecuaria genera grandes volúmenes de residuos: a) 8 kg de estiércol/100 kg de peso bovino [2] 3,8 kg de estiércol/100 kg de peso de equino, y C) 2 kg de estiércol/100 kg de peso porcino [3]. Sin embargo, a pesar de conocerse diferentes alternativas de gestión que brindan beneficios ambientales y promueven el desarrollo de las energías limpias, el manejo de estos desechos no ha sido aprovechado en su máximo potencial.

La digestión anaerobia (DA) se puede considerar como una alternativa para la gestión y valorización de los estiércoles proveniente de actividades pecuarias. La DA brinda tres beneficios: 1) producción de un biogás que puede ser utilizado

como fuente de energía renovable, 2) reducción en la contaminación ambiental producida por sustancias presentes en el estiércol y 3) producción de un fertilizante de tipo orgánico. En la DA los sustratos son biodegradados, por microorganismos en un ambiente libre de oxígeno [4].

La valorización energética de un residuo mediante DA requiere su caracterización bioquímica y microbiológica. El estudio bioquímico conlleva la cuantificación del Potencial de Biometanización (PBM), el cual se define como la capacidad de biodegradabilidad anaeróbica que posee un sustrato y se expresa en términos de rendimiento (Yp/s) [5].

El desempeño de los microorganismos en la DA para producir metano, se evalúa por medio de la actividad microbiana. Dependiendo del tipo de análisis requerido se pueden obtener resultados independientes que van desde actividad hidrolítica, acetogénica y/o metanogénica [6]. La DA permite la gestión y valorización energética de los estiércoles mediante la estabilización de su materia orgánica contenida. La DA de los estiércoles

permite la producción de energía renovable en sectores o zonas que no están interconectadas. En estos sectores la DA se realiza mediante la implementación de biodigestores domésticos que brindan excelentes beneficios económicos, técnicos y ambientales. Los digestores domésticos consisten en una bolsa de plástico, con una entrada (alimentación) y dos salidas en tubo de PVC (descarga de digerido y salida de biogás). El gas producido se recolecta en un reservorio también plástico. Este tipo de digestores, se caracterizan por no tener sistemas de agitación, ni calentamiento y ser de fácil adquisición, por lo cual son llamados sistemas de bajo costo [7,8].

Con respecto a la operación del digestor para evitar atascamientos con masas, formaciones de nata en su superficie y asegurar la operación a flujo continuo, se requiere diluir el estiércol con agua. Esto no solo evita los problemas mencionados, además mejora la producción de biogás.

Colombia cuenta con más de 500 biodigestores de bajo costo operando con estiércol porcino (EP) y estiércol bovino (EB) [9,10], en zonas interconectadas, generando biogás para cocción de alimentos. Sin embargo, para el estiércol equino (EE) aún no ha sido reportado ningún biodigestor. En Colombia, es usual que las granjas dispongan de EB, EE y EP. Por lo tanto, se esperaría poder gestionar y valorizar conjuntamente estos tres residuos. Sin embargo, no se tiene claro cuál sería la mejor o mejores combinaciones de los tres estiércoles y la proporción de mezcla para realizar una codigestión (CoDA) con elevado rendimiento. La operación del biodigestor requiere de la dilución del estiércol con agua, para facilitar el flujo de la carga alimentada de forma continua y garantizar una permanente producción de metano. Se ha demostrado que los rangos adecuados de dilución (V/V) de estiércol-agua son: 1:3 para EB, 1:3 para EE y 1:7 para EP [11]. En la CoDA se debe establecer la sinergia entre los sustratos para aumentar la producción de biogás, en comparación con la monodigestión. Estudios anteriores, afirman que la CoDA puede aumentar la producción de biogás de 25% a 400% sobre la DA de los mismos sustratos. Sin embargo, este es un proceso desafiante debido a los problemas de estabilidad y optimización [12, 13].

Para establecer las condiciones de operación de un BTBC mediante CoDA, se requiere caracterizar de forma bioquímica las mezclas de co sustratos. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar mediante el parámetro PBM, en términos

de rendimiento productivo de biogás, cuál es la mejor mezcla y dilución de los estiércoles bovino, porcino y equino. El indicador de este trabajo entrega los mejores rendimientos para diferentes alternativas de mezclas, los cuales a futuro brindan una alternativa para la puesta en marcha de un biodigestor doméstico, dada la disponibilidad de los estiércoles en las granjas.

## Materiales y métodos

El diseño metodológico se orientó hacia la determinación de biodegradabilidad anaerobia de los estiércoles (PBM) y la relación que se presenta entre las mezclas de disolución de estiércol. El desarrollo experimental se llevó a cabo en tres etapas: la primera consistió en la caracterización física de los estiércoles EE, EB, EP. En la segunda se realizó un Diseño estadístico simplex {3,3} aumentado con puntos axiales para analizar los 3 componentes y sus mezclas. Finalmente, se determinó la producción de biogás y la sinergia entre las mezclas de disolución de estiércol, obtenidas del diseño de experimentos.

## Recolección y caracterización de los sustratos

Los sustratos utilizados fueron EE, EB y EP, recolectados en una finca campesina (Lat. N 7°11'40,1", Long. 73°04'34,7") en Santander, Colombia. Esta finca cuenta con las tres especies de animales productoras de estos estiércoles (8 bovinos, 2 equinos y 2 cerdos), además del servicio de agua. La temperatura ambiente en la noche y la madrugada alcanza valores inferiores a 20 ±2 °C y durante el día la temperatura promedio es de 22 ±2 °C y 28 ±2 °C.

Los bovinos y equinos con los que cuenta la finca tienen periodos de estabulación de 12 horas. Por otra parte, los porcinos se encuentran las 24 horas en el corral.

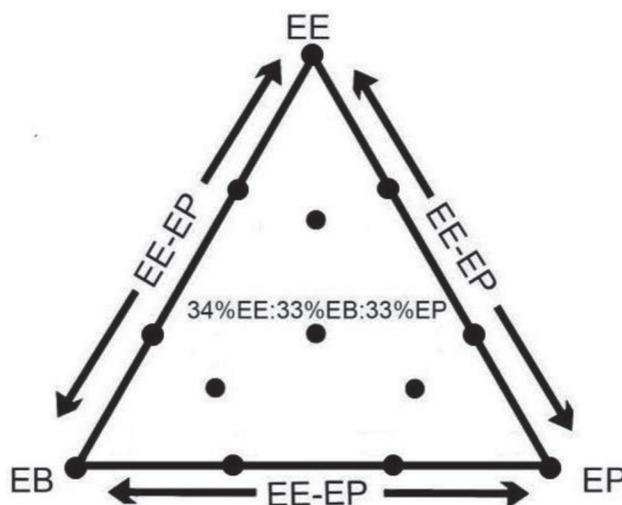
Los sustratos (EE, EB y EP) fueron caracterizados mediante pruebas de densidad, ST y SV de acuerdo con los protocolos establecidos por STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER [14]. Las pruebas se realizaron por triplicado para garantizar estabilidad y valores de referencia.

## Diseño estadístico de mezcla de sustratos

Dada la aleatoriedad y las diferentes formas de mezclar los componentes (estiércoles), se implementó un diseño estadístico enrejado simplex {3,3} aumentado con puntos axiales. El

diseño experimental se representa con un triángulo equilátero (figura 1). El simplex consta de 13 puntos (relaciones en porcentaje peso a peso de mezcla de diluciones), donde los vértices corresponden a la monodigestión de cada sustrato (soluciones de estiércoles puros). Los puntos sobre los ejes son las porciones binarias y los puntos del interior del simplex coinciden con las proporciones ternarias (Tabla 1).

El software STATGRAPHICS Centurion XVI versión 16.1.11 se empleó para generar y analizar el diseño en referencia. El test LSD Fisher se utilizó para determinar las diferencias estadísticamente significativas de las monodigestiones, digestiones binarias y ternarias con un intervalo de confianza del 95%.



**Figura 1.** Diseño gráfico enrejado de simplex {3, 3} aumentado con puntos axiales.

**Tabla 1.** Porcentajes de dilución de estiércol puro en cada experimento en %p.

		Experimento												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Dilución [%p/p]	EE	100	0	0	67	67	33	0	33	0	34	66	17	17
	EB	0	100	0	33	0	67	67	0	33	33	17	66	17
	EP	0	0	100	0	33	0	33	67	67	33	17	17	66
Tipo Digestión		Mono			Binaria						Ternaria			

Para los 13 experimentos se determinó la masa de agua y de estiércol puro, teniendo en cuenta 60g de capacidad de carga en los reactores y siguiendo

las relaciones estiércol-agua 1:3, 1:3 y 1:7 para estiércol equino, bovino y porcino respectivamente [11] ver Tabla 2.

**Tabla 2.** Porcentaje peso a peso de estiércol y agua en cada experimento.

		Experimento												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
[%p/p]	EE	25	0	0	16,7	16,7	8,3	0	8,3	0	8,5	16,5	4,2	4,2
	EB	0	25	0	8,3	0	16,7	16,7	0	8,3	8,2	4,2	16,5	4,2
	EP	0	0	12,5	0	4,2	0	4,2	8,3	8,3	4,2	2,2	2,2	8,3
	H <sub>2</sub> O	75	75	87,5	75	79,1	75	79,1	83,4	83,4	79,1	77,1	77,1	83,3
Tipo Digestión		Mono			Binaria						Ternaria			

### Determinación del potencial de biometanización de los sustratos y sus mezclas

El ensayo de metanización se llevó a cabo por triplicado a °C para los sustratos en diluciones y mezclas específicas, siguiendo el propuesto por Holliger C, Alves M, Andrade D, Angelidaki I, Astals S, Baier U, Wierinck I [5].

Se utilizaron reactores de 100 ml para mantener condiciones y propiedades termodinámicas constantes, con un volumen de operación de 60 ml,

dejando el volumen restante para la acumulación de biogás. Los reactores fueron sellados con tapón de butilo y agrafe metálico y purgados con N<sub>2</sub> para obtener condiciones anaerobias. Se cuantificó el volumen de metano durante 30 días utilizando el método de desplazamiento alcalino. La ecuación 1 se utilizó para llevar a condiciones normales el volumen de metano producido. La variable de respuesta fue el PBM representada con la ecuación 2.

$$V_0 = V \frac{(P - P_v) T_0}{P_0 T} \quad (1)$$

$V_0$ : Volumen de gas seco en condiciones normales [N-ICH<sub>4</sub>]  
 $V$ : Volumen registrado de biogás en la medición  
 $P$ : Presión de la fase de biogás en el momento de la lectura  
 $P_v$ : Presión de vapor en función de la temperatura ambiente  
 $T_0$ : Temperatura normal (273,15K)  
 $P_0$ : Presión normal (101325Pa)  
 $T$ : Temperatura ambiente

$$PBM = \frac{V_0}{SV} \quad (2)$$

$PBM$ : Potencial de biometanización [N-ICH<sub>4</sub>/kg sv adicionados]  
 $SV$ : Sólidos volátiles [kg sv]

Para determinar el potencial energético calórico se utilizó el factor de conversión 3,8 kWh/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> [15].

### Determinación de la sinergia de las codigestiones

La sinergia ( $\Phi$ ) se refiere a la descripción del trabajo colectivo de varios actores, creando así un efecto más grande que el esperado por la suma de los efectos de cada uno al operar independientemente [16].

Para calcular los efectos sinérgicos de la codigestión anaeróbica se realizó una comparación de la producción específica de metano de cada codigestión ( $PBM_{co-digestión}$ ) con el PBM ponderado ( $PBM_{ponderado}$ ) de acuerdo con la ecuación 3 propuesta por Labatut RA, Angenent LT, Scott NR [17].

$$(\Phi) = \frac{PBM_{co-digestión}}{PBM_{ponderado}} \quad (3)$$

$$PBM_{ponderado} = PBM_1 * f1 + PBM_2 * f2 + \dots + PBM_n * fn \quad (4)$$

Donde  $PBM_n$  representa la producción de metano de las monodigestiones del componente  $n$ . Los valores de  $f1, f2, \dots, fn$  son las fracciones de SV adicionados de según el componente  $n$ . Según los valores resultados para  $\Phi$  se puede determinar el efecto de la combinación, como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Significado del valor  $\Phi$ .

RESULTADO	DESCRIPCIÓN
$\Phi > 1$	Existe efecto sinérgico
$\Phi < 1$	Existe efecto antagónico
$\Phi = 1$	El resultado no es claro

## Resultados

### Caracterización física de los estiércoles

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización física de los estiércoles. Los resultados muestran que las densidades del EB y el EE 0,99 g/ml y 0,97 g/ml respectivamente,

presentan densidades cercanas a la del agua, por lo cual la homogeneidad en las diluciones se ve mejorada. En el estiércol porcino (EP) se evidenció la densidad más baja por lo cual se generaron suspensiones en la dilución, similar a lo reportado por André L, Paus A, Ribeiro T [18].

**Tabla 4.** Caracterización física de los estiércoles sin diluir.

Estiércol	Densidad [g/ml]	Sólidos volátiles [gSV/kg]	Fracción de materia orgánica [gSV/gST]
EB	0,99	151,23	80,92
EP	0,94	203,99	85,77
EE	0,97	169,19	83,21

La fracción de SV/ST representa la materia orgánica disponible para ser degradada en forma de biogás. Según los resultados, el estiércol porcino y el estiércol equino contienen las mayores concentraciones de materia orgánica, por lo cual son sustratos con mayor potencial para producción de biogás, comparado con el estiércol bovino.

### Potencial de biometanización (PBM) de estiércoles y sus mezclas

En las figuras 2, 3 y 4 se presenta el potencial de biometanización para la mono-digestión, la digestión binaria y la digestión de la mezcla ternaria, respectivamente. En la figura 2, el experimento 1 (estiércol equino) presenta una dinámica con dos tendencias: una hidrólisis rápida (degradación de materia orgánica soluble fácilmente biodegradable) hasta el día 16, y luego una hidrólisis lenta de las fibras y material particulado presente en el estiércol, hasta el final del proceso. Este ensayo alcanzó el mayor rendimiento de biogás (PBM de 17,09 N-ICH<sub>4</sub>/kg SV) comparado con el EB y EP. Lo anterior, debido a que el estiércol equino tiene una alta actividad hidrolítica (0,0231 gDQO/gSV) y metanogénica (0,0234 gDQO/gSV) [11]. En cuanto al experimento 2 (mono-digestión de estiércol bovino) se presenta una conversión de la materia orgánica hasta el día 10 y posteriormente se alcanza el estado estacionario con el rendimiento más bajo de metano 10,44 N-ICH<sub>4</sub>/kg SV comparado con EE y EP. De acuerdo con estos resultados, se concluye que el estiércol bovino es una matriz que requiere un co-sustrato para aumentar su producción de biogás. La mono-digestión de estiércol porcino (experimento 3) alcanzó el estado estacionario en el día 20 con un rendimiento de 15,13 %

más bajo que el estiércol equino. En términos estadísticos, la figura 5 muestra que los valores de PBM de las monodigestiones presentaron diferencias significativas (*p value* 5,04\*10<sup>-5</sup>) entre los 3 experimentos.

En la dinámica de las digestiones binarias de los estiércoles, (Figura 3) se presenta dos tendencias: hasta el día 13 todos los experimentos tienen una pendiente bastante similar, indicando una rápida de hidrólisis y ausencia de fase lag. Esta característica beneficia el uso de estas matrices para el arranque de digestores domésticos. Seguidamente, posterior al día 13 se observan cambios significativos en la evolución del rendimiento de metano con respecto al tiempo.

Las mezclas que contienen estiércol equino presentaron los mayores rendimientos; 51,24N-ICH<sub>4</sub>/kg SV, 46,61N-ICH<sub>4</sub>/kg SV, 41,78N-ICH<sub>4</sub>/kg SV para los experimentos 5, 6 y 8 respectivamente. Los resultados indican que la mezcla estiércol equino y estiércol porcino presenta las mejores propiedades bioquímicas para alcanzar altos rendimientos de metano. Los experimentos 7, 9 y 4 mostraron los rendimientos más bajos de metano 16,46N-ICH<sub>4</sub>/kg SV, 19,53N-ICH<sub>4</sub>/kg SV y 25,09N-ICH<sub>4</sub>/kg SV respectivamente. Sin embargo, en términos de producción de energía en forma de biogás, la mezcla de estiércoles resulta mejor que la mono-digestión de los mismos. Los resultados estadísticos de los experimentos 4 al 9 (mezclas binarias) señalan que existen diferencias significativas (*p value* 2,95\*10<sup>-14</sup>) entre ellos (Figura 5). Comparando los experimentos 7 y 9 por análisis de dos muestras, se presenta que no hay diferencias significativas con un valor de *p* de 0,0581. En la figura 4, que corresponde a las mezclas ternarias, se observa un comportamiento

similar al presentado por las mezclas binarias. La dinámica de producción de metano para la codigestión de dos o más estiércoles no presenta fase lag, arranca con una rápida velocidad y para el caso de aquellas mezclas que contienen estiércol equino, antes de estabilizarse, presentan una segunda pendiente, indicando un aumento en el rendimiento de producción de metano. Los experimentos con mayor contenido de estiércol equino presentaron PBM de 51,24N-ICH<sub>4</sub>/kg SV y 41,78 N-ICH<sub>4</sub>/kg SV. Estos resultados se correlacionan con los rendimientos de metano que reportaron las mezclas binarias. Estadísticamente, las mezclas ternarias tienen diferencias significativas (*p value* 2,04\*10<sup>-09</sup>). Sin embargo, al hacer la comparación de dos muestras (10 y

11) para los experimentos con mayor potencial de biometanización, el valor de (*p value* 0,958), indica que no existen diferencias significativas entre estos ensayos, por lo cual se infiere que la cantidad de estiércol equino es el factor más influyente en la co-digestión de estiércoles. El análisis de los experimentos demuestra que los estiércoles equino y porcino presentan los mejores rendimientos en una digestión anaerobia y que el estiércol bovino requiere un co-sustrato para aumentar la carga orgánica biodegradable del proceso. En este sentido, estudios anteriores determinaron que el lactosuero es uno de los mejores co-sustratos para el estiércol bovino por su concentración de materia orgánica soluble fácilmente biodegradable [10,19].

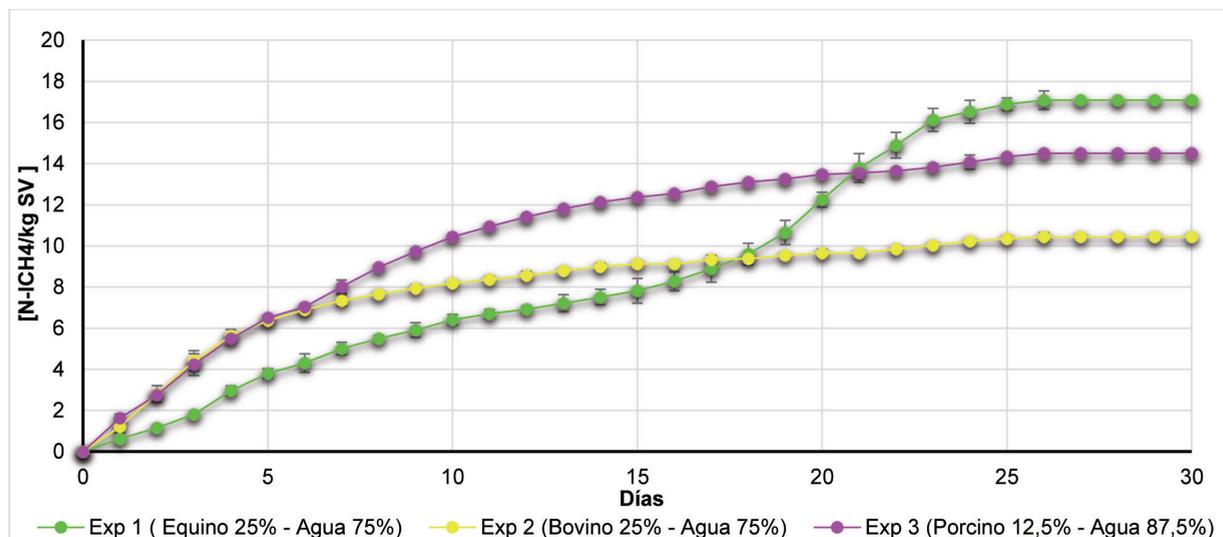


Figura 2. Potencial de biometanización: Monodigestión de estiércoles.

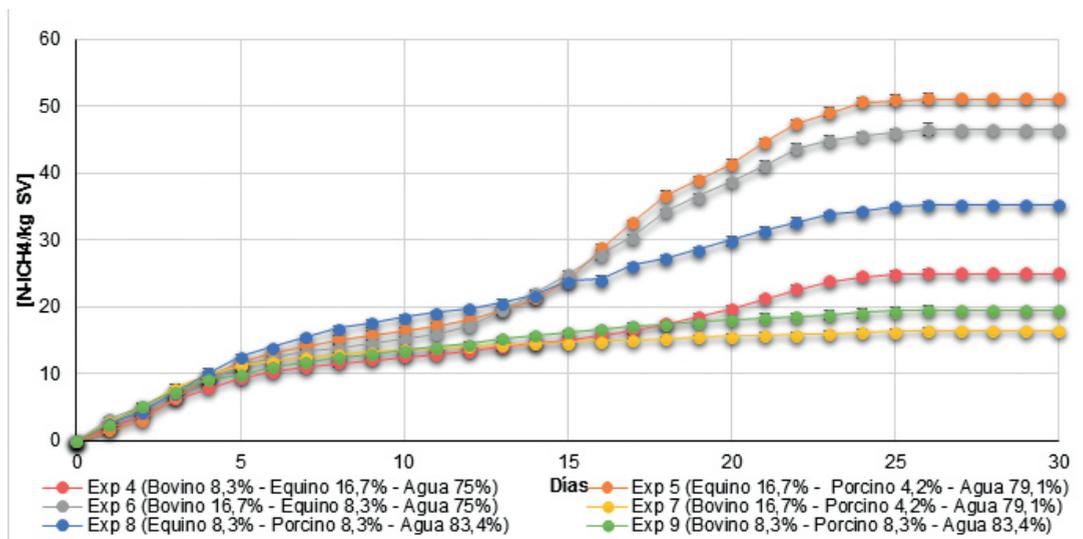


Figura 3. Potencial de biometanización: Digestión binaria de estiércoles.

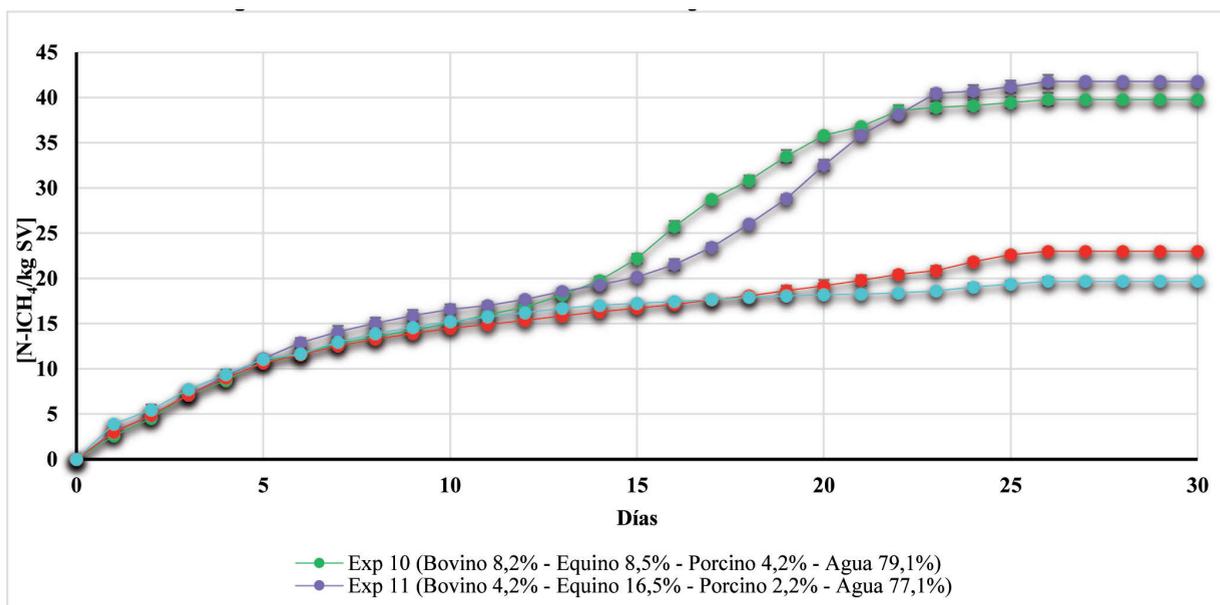


Figura 4. Potencial de biometanización: Digestión ternaria de estiércoles.

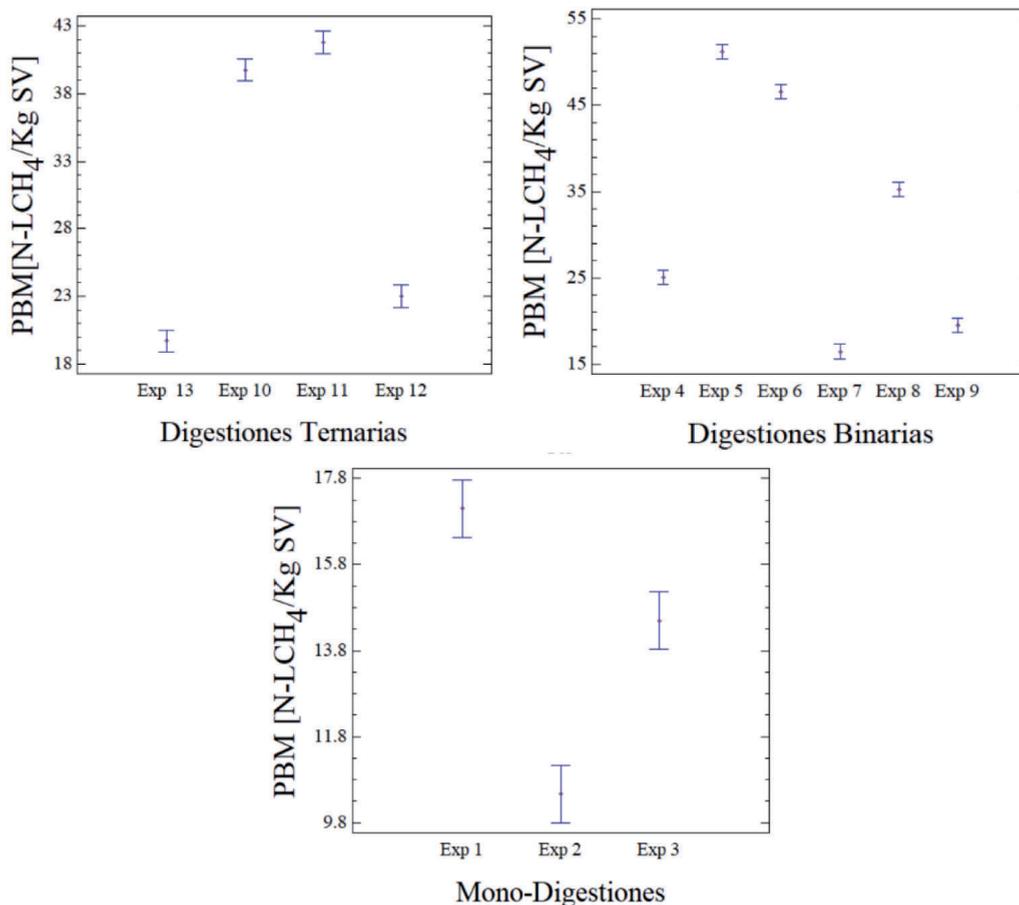


Figura 5. Análisis de medias de los experimentos: 3a. Monodigestiones, 3b. Digestiones Binarias y 3c. Digestiones Ternarias.

### Análisis de la sinergia de las digestiones de los estiércoles

La sinergia en la codigestión anaeróbica se describe como interacciones positivas entre sustrato y co- sustratos. Los efectos sinérgicos

aumentan la producción de metano con respecto a la monodigestión [16,20]. Este concepto se evidencia con los resultados presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Potencial de biometanización y sinergia de las codigestiones.

	Experimento	Dilución [%p/p]			PMB [N-CH <sub>4</sub> /kg SV]	
		EE	EB	EP		
Binario	4	69,4	30,6	0	1,65	25
	5	77,1	0	22,9	3,09	51,2
	6	35,5	64,5	0	3,63	46,6
	7	0	75,1	24,9	1,44	16,5
	8	45	0	55	2,25	35,3
	9	0	42,2	57,8	1,53	19,6
Ternario	10	40,8	35,4	23,9	2,77	39,2
	11	72,2	16,6	11,2	2,65	41,8
	12	19,7	68,4	11,9	1,9	23,3
	13	23,6	21,1	55,3	1,38	19,7

Los resultados demostraron que las mezclas binarias con menores valores de sinergia fueron aquellas que no contenían estiércol equino y/o estiércol porcino. Esto significa que los estiércoles equino y porcino son excelentes productores de biogás, con rendimientos mayores a los alcanzados por el estiércol bovino. Todas las co-digestiones (binarias y ternarias) son sinérgicas ( $\Phi > 1$ ). En las mezclas terciarias el comportamiento de la sinergia concuerda con el observado en las mezclas binarias. La mayor sinergia (3,63) corresponde a una mezcla estiércol equino-bovino (experimento 6) en la cual se alcanza un potencial de metano 347% mayor respecto a la mono-digestión de estiércol bovino. Sin embargo, al mezclar estiércol bovino con estiércol porcino (experimento 7) la sinergia disminuye de 3,63 a 1,44. Lo anterior permite evidenciar que la relación de mezcla y el tipo de co-sustrato influyen significativamente en el rendimiento del proceso.

Actualmente, los usuarios de los digestores domésticos realizan mezclas del estiércol al azar, lo que trae como consecuencia falsas expectativas en cuanto a la producción de biogás, atascamiento en los digestores y en el peor de los escenarios

abandono de la tecnología anaerobia. En este sentido, los resultados de esta investigación permiten, mediante un diseño experimental usando la sinergia ( $\varphi$ ) como un indicador, seleccionar las relaciones de mezcla adecuadas para digestión anaerobia de estiércoles, contribuyendo a mitigar los problemas antes referidos.

### Análisis del potencial energético de las digestiones de los estiércoles

Los productores agropecuarios presentan diversas situaciones agrícolas, en cuanto a la cantidad y el tipo de animales. Teniendo en cuenta que 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> se convierte en 3,8 kwh de energía calórica, es posible establecer una variedad de escenarios para realizar un mejor aprovechamiento de los estiércoles como fuente energética alternativa, principalmente para granjas que cuenten con equinos, bovinos y porcinos y se encuentren ubicadas en zonas de difícil acceso. Así las cosas, como se observa en la figura 7, los granjeros pueden disponer de energía en biogás, seleccionando la alternativa que más les convenga, dependiendo de la cantidad y tipo de animales y de estiércoles.

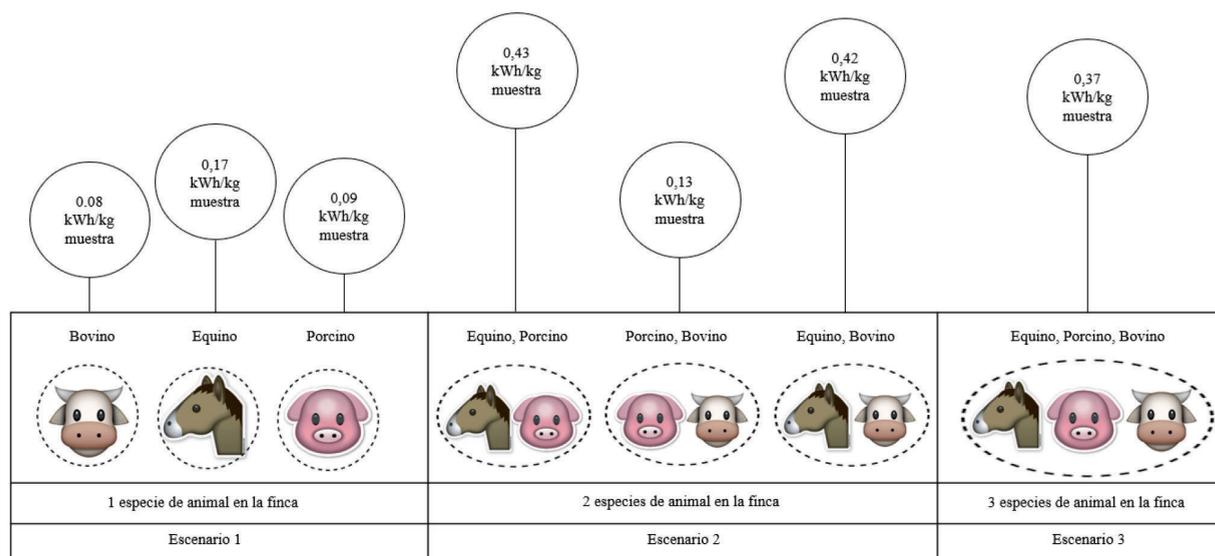


Figura 7. Escenarios.

## Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue identificar la relación de mezcla más favorable entre estiércoles para su gestión y valorización energética en una granja, a partir de digestores domésticos. Los resultados mostraron que la co digestión de mezclas de estiércoles, tienen mayores potenciales de biometanización que las monodigestiones. Las mezclas que contenían estiércol equino presentaron el mejor potencial energético (mezcla equino porcino) y el efecto sinérgico más alto (mezcla equino bovino). Adicionalmente, se evidenció que el estiércol bovino requiere un co sustrato para incrementar los rendimientos de biogás. En este estudio se determinaron diferentes escenarios de mezclas entre estiércoles que sirven como alimento de biodigestores domésticos para mejorar la soberanía energética en fincas que cuentan con diferentes tipos de animales.

## Referencias bibliográficas

- [1] Instituto Colombiano Agropecuario. Censo Bovino, Equino y Porcino en Colombia. En: Censo Pecuario Nacional. Colombia: Instituto Colombiano Agropecuario; 2017.
- [2] Martí H. Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación: Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano. Bolivia: Cooperación Técnica Alemana, La Paz (Bolivia); 2008.
- [3] SAGARPA. Utilización de estiércoles. México: Secretaria de Desarrollo rural. Dirección general de apoyo para el desarrollo rural de Montecillo, Estado de México; 2000.
- [4] Angelidaki I, Karakashev D, Batstone DJ, Plugge CM, Stams AJM. Biomethanation and its potential. *Met. in Enzymology*. 2011;494:327-51.
- [5] Holliguer C, Alves M, Andrade D, Angelidaki I, Astals S, Baier U, *et al.* Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci Technol*. 2016;74: 2515-2522.
- [6] Astals S, Batstone D, Tait S, Jensen P. Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Res*. 2015;81:208-215.
- [7] Naik L, Gebreegziabher Z, Tumwesige V, Babulo Balana B, Mwirigi J, Austin G. Factors determining the stability and productivity of small scale anaerobic digesters. *Biomass Bioenergy*. 2014;70:51-57.
- [8] Garfí M, Martí-Herrero J, Garwood A, Ferrer I. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renew. and Sustain. Eng. Rev*. 2016;60:599-614.
- [9] Castro L, Escalante H, Jaimes-Estévez J, Díaz LJ, Vecino K, Rojas G, Mantilla L. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource tech*. 2017;239:311-7.
- [10] Escalante H, Castro L, Amaya MP, Jaimes L, Jaimes-Estévez J. Anaerobic digestion

- of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Management*. 2018;71:711-8.
- [11] Castro L, Mojica A, Tovar, Quintero M, Escalante H. Efecto de la dilución agua/ estiércol sobre la actividad microbiana y el potencial de biometanización en procesos anaerobios. *RedBioLac*. 2018.
- [12] Cavinato C, Cavinato F, Bolzonella D, Pavan P. Thermophilic anaerobic co-digestion of cattle manure with agro-wastes and energy crops: comparison of pilot and full scale experiences. *Bioresour. Tech*. 2011;101(2):545-50.
- [13] Shah F, Mahmood Q, Rashid N, Pervez A, Raja I, Shah M. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renew. and Sustain. Eng. Rev*. 2015;42:627-42.
- [14] Rice EW, Baird RB, Eaton AD. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23 ed. United States: American Public Health Association; 2017.
- [15] Lombardi M, Tricase C. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage. *Technicaleconomic considerations*. *Renew. Eng*. 2009;34(3):477-85.
- [16] Castro L, Escalante H, Lambis L, Marín J. Synergistic effects in anaerobic codigestion of chicken manure with industrial wastes. *Revista DYNA*. 2018;85:135-141.
- [17] Labatut RA, Angenent LT, Scott NR. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresour. Tech*. 2011;102(3):2255-64.
- [18] André L, Pauss A, Ribeiro T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. *Bioresour. Tech*. 2018;247:1027-37.
- [19] Fernández C, Martínez E, Moran A, Gómez X. Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. *Revisión bibliográfica*. *rev.ion*. 2016;29:47-62.
- [20] Mata-Alvarez J, Dosta D, Romero-Güiza J, Fonoll X, Peces M, Astals S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renew. and Sustain. Eng. Rev*. 2014;36:412-27.