

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Efecto de la dilución y la co-digestión como tratamientos para la biodegradabilidad anaeróbica del mucílago de cacao

Juan Manuel Navarro Rodríguez y Jessica Paola Nieto Muñoz

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico
Modalidad Investigación

Director

Humberto Escalante Hernández
Ingeniero Químico, Ph.D.

Codirectores

Liliana del Pilar Castro Molano
Ingeniera Química, Ph.D.

María Paula Garay Jácome
Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2024

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas y darnos la oportunidad de crecer y convertirnos en profesionales.

Al Grupo de Investigación INTERFASE y al Laboratorio de Biotecnología de la Escuela de Ingeniería Química por brindarnos los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

A la profesora Liliana del Pilar Castro Molano y al Profesor Humberto Escalante Hernández por su invaluable orientación y confianza durante todo el proceso de esta investigación. Su sabiduría y experiencia han sido fundamentales.

A la Ingeniera María Paula Garay Jácome, por su paciencia, acompañamiento y dedicación constante. Su apoyo ha sido un gran pilar para la culminación de este trabajo.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos.....	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1. El cacao.....	14
2.2. Digestión anaeróbica.....	14
2.3. Pruebas de potencial de biometanización	15
2.4. Potencial de biometanización teórico	17
2.5. Cinética de producción de metano	17
3. Metodología.....	18
3.1. Fase 1: Revisión bibliográfica.....	18
3.2. Fase 2: Evaluación del inóculo y caracterización de los sustratos.....	18
3.3. Fase 3: Evaluación de la dilución sobre la biodegradabilidad anaerobia del mucílago de cacao	19
3.4. Fase 4. Estimación del potencial de biometanización para la co-digestión anaerobia del mucílago de cacao con estiércol bovino	21
4. Resultados.....	25

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

4.1.	Revisión bibliográfica.....	25
4.2.	Evaluación del inóculo y caracterización de los sustratos.....	28
4.3.	Evaluación de la dilución del mucílago de cacao sobre la producción de metano	30
4.4.	Estimación del potencial de biometanización en la co-digestión.....	35
5.	Conclusiones.....	46
	Recomendaciones	47

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Lista de tablas

Tabla 1. Métodos analíticos de caracterización para los sustratos e inóculo	19
Tabla 2. Diseño de experimentos para el tratamiento por CoDA	21
Tabla 3. Ecuaciones aplicadas para evaluar los factores sinérgicos en la co-digestión	23
Tabla 4. Matriz de decisión para los tratamientos aplicables a la DA de residuos del cacao	27
Tabla 5. Caracterización del mucílago de cacao (sustrato), estiércol bovino (co-sustrato) y el lodo de estiércol bovino empleado como inóculo.	28
Tabla 6. Indicadores de falla para el proceso de DA en operación Batch.....	33
Tabla 7. Parámetros: AGV, Capacidad buffer, pH, %CH ₄ y PBM de las co-digestiones a diferentes condiciones experimentales.	37
Tabla 8. Condiciones y resultados teóricos del punto óptimo.....	42
Tabla 9. Revisión bibliográfica de la DA de residuos de la industria del cacao.	56
Tabla 10. Parámetros cinéticos a temperatura de a) 25°C y b) 37°C.	58
Tabla 11. PBM y concentración de AGV final para las monodigestiones.	59
Tabla 12. Parámetros cinéticos experimentales del tratamiento de co-digestión.	60
Tabla 13. Parámetros cinéticos esperados del tratamiento de co-digestión.....	61

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Lista de figuras

Figura 1. Rendimientos de biogás y metano para residuos en la industria del cacao según la literatura.	26
Figura 2. Potencial de biometanización acumulado para dilución a RIS de 4 a T de 25 y 37 °C	30
Figura 3. Producción acumulada de metano para DA de mucílago a diferentes diluciones 37°C.	32
Figura 4. Comportamiento inicial y final de AGV , Capacidad Buffer y PBM a temperatura de a)25°C y b)37°C.	34
Figura 5. PBM de las CoDA (Mucílago-Estírcol Bovino) a diferentes condiciones de RIS, T y fM.....	35
Figura 6. Producción de metano acumulado y parámetros cinéticos para CoDA 11 11.	39
Figura 7. Efectos sinérgicos de la co-digestión de mucílago y estiércol bovino con ajuste de modelo de Primer Orden	39
Figura 8. Diagrama de Pareto.....	43
Figura 9. Superficie de respuesta y gráfico de contorno a RIS fija de 4.....	44
Figura 10. Superficie de respuesta y gráfico de contorno manteniendo fija la temperatura.....	45
Figura 11. Curvas de ajuste de los modelos cinéticos en co-digestión.	62

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Lista de apéndices

APÉNDICE A. Revisión bibliográfica.....	56
APÉNDICE B. Ajuste de modelos cinéticos del tratamiento de dilución.....	58
APÉNDICE C. Parámetros cinéticos y curvas de producción de metano para el tratamiento de Co-DA.....	59

Glosario

AGV: Ácidos grasos volátiles

AH: Actividad hidrolítica

AME: Actividad metanogénica específica

AT: Alcalinidad total

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

CoDA: Co-digestión anaeróbica

DA: Digestión anaeróbica

DQO: Demanda química de oxígeno

EB: Estiércol bovino

fM: Fracción de mucílago

PBM: Potencial de biometanización

R²: Coeficiente de determinación

RIS: Relación inóculo-sustrato

RMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Resumen

Título: Efecto de la dilución y la co-digestión como tratamientos para la biodegradabilidad anaeróbica del mucílago de cacao*

Autor: Juan Manuel Navarro Rodríguez, Jessica Paola Nieto Muñoz**

Palabras Clave: Tratamientos, dilución, co-digestión, mucílago de cacao, estiércol bovino

Descripción: En este trabajo de investigación se evaluó el efecto de los tratamientos de dilución y co-digestión con estiércol bovino en el mucílago de cacao sobre su potencial de biometanización mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia en escala batch. La producción de metano fue medida mediante método manométrico y cromatografía de gases. Para el tratamiento de dilución se realizaron experimentos a temperaturas de 25°C y 37°C y establecieron porcentajes de mucílago de 100%, 75%, 50% y 25%, con un tiempo de experimentación de 8 días. Se evaluó la estabilidad del proceso mediante los parámetros de AGV, capacidad buffer, pH y % CH₄. Se obtuvo un máximo rendimiento de 92.6±11.044 NL CH₄ kg⁻¹ SV a 25°C y una dilución del 50%, valor que se encuentra 76% por debajo del PBM teórico (381 NL CH₄ kg⁻¹ SV) a causa de la inestabilidad del proceso, por lo tanto, se requiere de un co-sustrato o tratamiento que permita compensarla. Para la co-digestión con estiércol bovino, el tiempo de experimentación fue de 43 días y se realizó un diseño 2³ con puntos axiales y punto central que comprende las temperaturas 21, 25, 31, 37 y 41 °C, RIS de 1.3, 2, 4 y 4.7 y fM de 0.2, 0.5 y 0.8. Se obtuvo un máximo rendimiento de 313±20.64 NL CH₄/kg SV a 37°C, RIS de 4 y fM de 0.8 y en su mayoría los experimentos fueron estables al evaluar los parámetros de AGV y capacidad buffer. Por otra parte, se determinó la sinergia de los efectos cinéticos al ajuste del modelo de Primer Orden, donde se obtuvo dos experimentos con sinergias totales significativas. La CoDA con estiércol bovino resultó ser un tratamiento efectivo para el mucílago de cacao.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández, Doctor en Ingeniería Química. Co-directores: Liliana del Pilar Castro Molano, Doctor en Ingeniería Química; María Paula Garay Jácome, Ingeniera Química, Candidata a Magister.

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Introducción

La industria mundial del cacao produce más de 4 millones de toneladas anuales de grano seco y América contribuye aproximadamente con el 17% del volumen total (Arvelo et al., 2016). Como caso particular, Colombia se destaca por ser el quinto productor de cacao en Latinoamérica. La producción anual de cacao ha aumentado un 49% desde 2012, pasando de 41.760 toneladas a 62.158 toneladas en 2022 (Fedecacao, 2022) y se estima que alrededor de 65.000 familias se dedican a la producción de cacao en el país (MinAgricultura, 2021). Aunque la producción cacaotera trae consigo beneficios sociales y económicos, durante el procesamiento del fruto alrededor del 80% se descarta como biomasa residual, incluidas las cáscaras, cascarilla, placenta y mucílago (Vásquez et al., 2019). Estos residuos no se gestionan de manera correcta y son depositados directamente al suelo ocasionando acumulaciones (Vásquez et al., 2019) y daños ambientales como enfermedades en los cultivos y contaminación al suelo y agua por la generación de lixiviados ácidos (Franco et al., 2010; Mansur et al., 2014) debido a la descomposición mediante procesos fermentación, lo que resulta en emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera contribuyendo al incremento del calentamiento global (Hansen & Cheong, 2019).

La digestión anaeróbica (DA) es una alternativa de gran interés por su potencial para obtener bioenergía y gestionar los residuos orgánicos del beneficio del cacao. La DA es un proceso biológico donde se descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, en dos productos principales: biogás y digerido. El biogás contiene principalmente CH_4 y CO_2 , tiene un alto potencial energético para su aprovechamiento como energía térmica o electricidad. El digerido es un efluente líquido rico en nutrientes, que puede ser empleado como acondicionador de suelos o agua de riego y según su composición podría facilitar la precipitación de cristales de estruvita (Castro et al., 2018; Kovačić et al., 2022; Panuccio et al., 2021). La DA se considera como una tecnología para la gestión de residuos agroindustriales, y, una fuente de energía renovable que promueve un modelo de economía circular (E. Campos et al., 2004; L. Castro et al., 2017a; IDAE, 2007).

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Respecto a la DA de residuos de cacao, la literatura hace referencia principalmente a la degradación anaerobia de la cáscara de cacao. Por ejemplo, Acosta et al., (2021) estudiaron la co-digestión anaeróbica (CoDA) de cáscara de cacao con estiércol bovino (EB) para mejorar el rendimiento de metano producido y la estabilización del proceso demostrando que el EB contrarresta la inhibición por acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), logrando estabilizar el proceso. Por su parte, Rodríguez et al., (2017) hicieron una comparación en la producción de metano mediante pruebas de potencial de biometanización (PBM) empleando estiércol porcino, residuos urbanos y cáscaras de cacao, obteniendo una baja producción de CH_4 al utilizar la cáscara de cacao en comparación con los demás sustratos.

En la literatura se evidencia la poca investigación del mucílago de cacao como sustrato en el proceso de DA, residuo que corresponde aproximadamente al 4.58% obtenido en la etapa del procesamiento del fruto (Vergara-Mendoza et al., 2022). Este se caracteriza por tener un elevado contenido de materia orgánica (161.4 g SV/kg), representado por carbohidratos que en su mayoría son azúcares simples (Gutiérrez & Gomero, 2020). Estas características bioquímicas hacen del mucílago un sustrato atractivo para ser gestionado a través de DA, pero a su vez representan un desafío debido a que es un sustrato de rápida degradación, lo cual indica que en este caso, el proceso anaerobio se ve limitado por factores operacionales como: una baja alcalinidad ($\text{pH} < 4$) (Mata-Alvarez et al., 2000), superación del límite de sólidos totales recomendados para la DA (150 g ST/kg) (Park et al., 2018), alta concentración de carbohidratos (10.7-68.5%) y azúcares reductores que pueden ocasionar acumulación de AGV lo que podría conllevar a la inhibición del proceso, bajos niveles de proteínas (0.41-0.56%) y lípidos (1.91-3.54%) (Rangel et al., 2021; Vásquez et al., 2019) y una inadecuada relación carbono nitrógeno ($\text{C/N} > 30$) (Mao et al., 2015). Por lo anterior, se identifica que se debe realizar un tratamiento al sustrato (mucílago de cacao) con el fin de obtener condiciones favorables para que se pueda llevar a cabo el proceso de DA. Dos posibles tratamientos al mucílago de cacao son la dilución con agua y la co-digestión anaerobia con estiércol bovino (EB).

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

El tratamiento de dilución con agua puede ser aplicado para mejorar la eficiencia del proceso, debido a que ofrece ventajas como: reducción de costos operacionales, disminuye el impacto de pretratamientos térmicos y químicos, así como también mejora la disponibilidad de nutrientes para la biomasa y atenúa el efecto inhibitorio por acumulación de AGV (Mendieta et al., 2020). Por otra parte, la CoDA es una estrategia de optimización al proceso, que consiste en el uso de dos o más sustratos para mejorar los rendimientos de biogás (Mosquera et al., 2020), se emplea para mejorar el equilibrio de nutrientes y disminuir la concentración de compuestos tóxicos, además, se obtienen efectos sinérgicos entre los sustratos, permitiendo una mayor carga de materia orgánica biodegradable y mejora la relación C/N de la materia prima (Mata-Alvarez et al., 2000). La literatura reporta investigaciones donde se usan diferentes tipos de co-sustratos, siendo los más usados el estiércol bovino fresco, el estiércol porcino, los lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, desechos de alimentos, entre otros que han sido estudiados previamente (Mosquera et al., 2020). La CoDA con estiércol bovino ofrece ventajas como una mayor producción de biogás y recuperación de energía, esto se debe a la capacidad amortiguadora que permite compensar la acidez y deficiencia de nutrientes en los residuos agroindustriales (Acosta et al., 2021; Jaimes-Estévez et al., 2022).

Basado en lo anterior, en este trabajo de grado se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son los efectos de los tratamientos de dilución y de CoDA usando como co-sustrato estiércol bovino sobre la biodegradabilidad anaerobia del mucílago de cacao? Los resultados de este trabajo de grado contribuyen al conocimiento científico y a la industria cacaotera sobre la gestión y valorización anaerobia del mucílago de cacao dado que se evidencia una notable carencia de investigaciones para su gestión mediante DA.

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar en operación batch a escala de laboratorio la dilución del mucílago de cacao y su co-digestión con estiércol bovino como tratamientos mediante ensayos de biodegradabilidad representada por la producción de metano.

1.2 Objetivos específicos

Evaluar la dilución del mucílago de cacao como pretratamiento físico sobre la producción de biometano mediante ensayos de biodegradabilidad anaerobia y la estimación de los parámetros cinéticos.

Determinar el efecto de la CoDA de mucílago de cacao con estiércol bovino como tratamiento biológico sobre el potencial de biometanización y la estimación de los parámetros cinéticos.

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

2. Marco conceptual

2.1. El cacao

La cadena agroindustrial de cacao tiene como materia prima principal el grano para elaborar productos como: licor de cacao, manteca de cacao y chocolate (Vergara-Mendoza et al., 2022; Villamizar Jaimes & Rodríguez Guerrero, 2016). Para el cultivo de cacao se requiere de condiciones cálidas y húmedas para su desarrollo y en Colombia se recomienda un régimen de temperatura que se encuentre entre los 18 y los 32°C, con una óptima entre los 25 y los 28°C (Arvelo et al., 2016).

El fruto de cacao está compuesto por corteza rugosa o cáscara externa llamada mazorca, que contiene entre 30 y 40 semillas (grano) alineadas y adheridas a una estructura denominada placenta. Estas semillas están envueltas por una cascarilla y rodeadas de una pulpa mucilaginoso aromática de color blanco, de sabor ácido azucarado y textura pegajosa (Niembro & Vásquez, 2010).

2.2. Digestión anaeróbica

En el proceso de DA se llevan a cabo cuatro etapas metabólicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante la hidrólisis, las macromoléculas se degradan (carbohidratos, proteínas y lípidos) mediante bacterias hidrolíticas, permitiendo la generación de compuestos solubles (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) que pueden atravesar la membrana celular de las bacterias fermentativas para ser metabolizados en la etapa de acidogénesis, transformándolos en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes y cetonas. La acetogénesis es donde se convierten los ácidos grasos de cadena corta, mediante bacterias acetogénicas, en hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Finalmente, en la etapa de metanogénesis se produce metano a partir del ácido acético por bacterias acetoclásticas y del hidrogeno y dióxido de carbono por bacterias hidrogenotróficas (A. Campos, 2001; Lorenzo & Obaya, 2005).

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

2.3. Pruebas de potencial de biometanización

Con el fin de determinar la capacidad de producción de metano de un determinado residuo, se realizan pruebas de PBM, las cuales permite cuantificar la biodegradabilidad de un sustrato y se define como la cantidad máxima de metano que se puede generar de un sustrato por masa de materia orgánica añadida (Koch et al., 2020). Las pruebas implican el uso de uno o varios sustratos junto con un inóculo activo, bajo condiciones operacionales definidas a escala de laboratorio en reactores batch y la medición del volumen de biogás y metano generado en el tiempo (Bres et al., 2022); el metano generado durante la DA se cuantifica por diferentes métodos de medición (Cárdenas et al., 2016) (gravimétrico, manométrico, volumétrico o de cromatografía de gases) y se expresa como volumen de metano producido a condiciones normales (0°C y 1 atm) por unidad de materia orgánica añadida en función de sólidos volátiles (SV) o en demanda química de oxígeno (DQO) (Holliger et al., 2016)

Las pruebas de PBM tienen como objetivo (Bres et al., 2022):

- Observar el comportamiento de dos o más sustratos cuando se co-digestan juntos y definir la relación óptima entre el sustrato y el co-sustrato.
- Determinar la incidencia de un pretratamiento (tipo y condiciones) sobre la biodegradabilidad del sustrato en el rendimiento de metano y evaluar sustancias inhibitorias que se producen durante el proceso anaeróbico.
- Determinar la cinética de degradación mediante el uso de modelos matemáticos.

En consideración, se presenta una revisión sobre los factores y condiciones que afectan al desarrollo de las pruebas de PBM:

Relación inóculo-sustrato (RIS): La relación inóculo (expresado en SV) respecto al sustrato (expresado en SV) se interpreta como una carga orgánica y es básico para estimar el potencial de biometanización (Hashimoto, 1989). Holliger et al., (2016) recomiendan que la proporción de SV del inóculo sea mayor que la del sustrato, para

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

minimizar problemas de acidificación o inhibición. Además, sugieren que para sustratos fácilmente biodegradables se debe utilizar una RIS igual o mayor a 4, puesto que la rápida degradación de la materia orgánica induce a la acumulación de AGV generando problemas de inhibición.

Ácidos Grasos Volátiles (AGV): Los ácidos son intermediarios del proceso anaeróbico y son los precursores de la metanogénesis (Lorenzo & Obaya, 2005). Un incremento en la concentración de AGV en el sistema se asocia con una reducción en la producción de biogás y con efectos de inhibición. Concentraciones de AGV inferiores a 3000 mg ácido acético/L no afectan la producción de biogás y por encima de 4000 mg ácido acético/L se presentan disminuciones (A. Campos, 2001).

Alcalinidad: Durante la DA se producen ácidos orgánicos que pueden ocasionar una disminución en el pH. Por consiguiente, es importante mantener un adecuado nivel de alcalinidad para contrarrestar la acumulación de ácidos y mantener el equilibrio del proceso. La literatura reporta que elevadas concentraciones de alcalinidad superiores a 6500 mg/L conducen a efectos tóxicos para el desarrollo de los microorganismos (Parra, 2015).

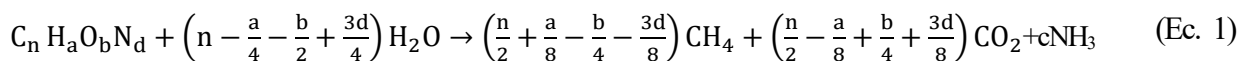
pH: Las bacterias metanogénicas metabolizan de manera efectiva en un rango de pH entre 6.5 a 8.2 con un óptimo en 7.0. Sin embargo, los mayores rendimientos de biogás se encuentran a pH entre 6.5 a 7.5. El pH está asociado a efectos de acidificación y varía por la concentración de AGV, características fisicoquímicas de los sustratos, alcalinidad del sistema o la fracción de dióxido de carbono producida (Parra, 2015).

Relación carbono nitrógeno (C/N): Refleja los niveles de nutrientes de un sustrato, con un rango eficiente entre 25 a 30 (Mao et al., 2015). Un valor mayor ocasiona una descomposición lenta de la materia orgánica, por lo tanto, el crecimiento microbiano se ve afectado por la falta de nitrógeno, por el contrario, un valor inferior puede llevar a la formación excesiva de amonio generando efectos tóxicos o inhibición para el proceso de DA (Kondusamy & Kalamdhad, 2014; Rodríguez et al., 2017b).

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

2.4. Potencial de biometanización teórico

El PBM teórico (B_0) es una estimación de la cantidad máxima de biogás que podría generarse de un sustrato a partir del proceso de DA. Este se estima mediante la formula reportada por Buswell & Mueller, (1952) teniendo en cuenta la composición elemental del sustrato, como se muestra en las ecuaciones (Ec. 1) y (Ec. 2).



$$B_0 = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3d}{8}\right) * 22400}{12n + a + 16b + 14d} \quad (\text{Ec. 2})$$

2.5. Cinética de producción de metano

Se han empleado modelos como *i*) modelo de Primer Orden (Ec. 3) y *ii*) modelo de Gompertz Modificado (Ec. 4). Estos modelos han sido empleados por diferentes investigadores (Karki et al., 2022; Mao et al., 2017; Zhang et al., 2021; Zhen et al., 2015) para describir la cinética de producción de metano y para estudiar los parámetros que caracterizan el proceso de DA. El modelo de Primer Orden es simplificado y la producción de metano generalmente sigue un patrón de cinética de primer orden, asumiendo que la hidrólisis constituye el paso limitante del proceso (Wang et al., 2020). El modelo de Gompertz Modificado se fundamenta en la premisa de que las tasas de producción de metano se corresponden con las tasas de crecimiento bacteriano, especialmente cuando se observa inhibición en el proceso (Karki et al., 2022; Mao et al., 2019; Wang et al., 2020).

$$PBM = PBM_0(1 - e^{-kt}) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$PBM = PBM_0 e^{\left\{-e^{\left[\frac{R_{max}e}{PBM_0}(\lambda - t) + 1\right]}\right\}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: $PBM(t)$: Producción acumulada de metano [L CH₄ kg⁻¹ SV], PBM_0 : Máxima producción de metano del sustrato [L CH₄ kg⁻¹SV], R_{max} : Tasa máxima de producción de metano [L CH₄ kg⁻¹ SV d], λ : Periodo de adaptación (fase de retraso) [d] t : Tiempo [d], k : Constante de degradación [d⁻¹]

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

3. Metodología

Para estudiar la biodegradabilidad anaeróbica del mucílago de cacao, se establecieron cuatro fases metodológicas que permiten dar respuesta a los objetivos planteados. En la primera fase se realizó una revisión bibliográfica sobre la DA de residuos de cacao. La segunda fase, permitió evaluar la calidad del inóculo, así como conocer la naturaleza fisicoquímica de cada sustrato. En la tercera fase, se evaluó el efecto de la dilución como tratamiento y la estabilidad del proceso a partir de parámetros cinéticos. Finalmente, en la cuarta fase se estimó el PBM para analizar el efecto de la CoDA sobre el rendimiento de metano durante el proceso, la sinergia y la influencia de variables operacionales como la temperatura, RIS y fracción de mucílago. También se determinaron los parámetros cinéticos que describen el comportamiento de la producción de metano durante la CoDA.

3.1. Fase 1: Revisión bibliográfica

Se realizó una búsqueda bibliográfica utilizando los recursos que ofrece la Biblioteca Virtual de la Universidad Industrial de Santander; tomando como referencia estudios relacionados con el efecto del uso de residuos de la agroindustria cacaotera y de naturaleza similar en el proceso de DA. A partir de la información recopilada, se realizó una categorización de la información teniendo en cuenta lo siguiente: tipo de tratamiento, temperatura, tipo de operación, tipo de inóculo, rendimiento de biogás y rendimiento de metano. Además, se realizó un cuadro de análisis cualitativo para determinar el tratamiento más favorable a implementar en el proceso DA.

3.2. Fase 2: Evaluación del inóculo y caracterización de los sustratos

3.2.1. *Recolección de inóculo y sustratos*

El mucílago de cacao, empleado como sustrato y el estiércol bovino fresco como co-sustrato para el proceso de CoDA fueron recolectados de una unidad productora de cacao ubicada en Colombia, que genera 242 t de mucílago de cacao por año. El inóculo, lodo de estiércol bovino estabilizado, proviene de un digestor doméstico de bajo costo que trata estiércol bovino desde hace 8 años, ubicado en la finca Villa Marcella, situada en el

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

municipio de Girón, Santander. Los sustratos fueron almacenados en bolsas de plástico selladas y refrigeradas a temperatura inferior a -10°C.

3.2.2. Caracterización del inóculo y sustratos

El inóculo y los sustratos fueron caracterizados de acuerdo con el contenido de materia orgánica representada en los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO), el pH, la alcalinidad total (AT) y el contenido de ácidos grasos volátiles (AGV). En la Tabla 1 se presentan los parámetros determinados y los métodos analíticos aplicados al inóculo y/o los sustratos.

Tabla 1.

Métodos analíticos de caracterización para los sustratos e inóculo.

Parámetro	Unidades	Mucílago	Estiércol Bovino	Inóculo	Método analítico
SV	g kg ⁻¹	✓	✓	✓	Termogravimétrico SM 2540
SV	g kg ⁻¹	✓	✓	✓	SME 2450E
DQO	g DQO L ⁻¹	✓	✓	✓	SM-5220-D
pH	-	✓	✓	✓	Potenciometría
AT	g CaCO ₃ L ⁻¹	✓	✓	✓	Titrimétrico
AGV	g CH ₃ COOH L ⁻¹	✓	✓	✓	Titrimétrico
AH	g DQO CH ₄ L ⁻¹	-	-	✓	Manométrico y cromatografía
AME	g DQO CH ₄ L ⁻¹	-	-	✓	Manométrico y cromatografía

Adicionalmente, al mucílago se le determinó su composición elemental, contenido de nutrientes, lípidos, carbohidratos y azúcares (cromatografía líquida- RIS GOMEAZ.01). Para evaluar la calidad del lodo de estiércol bovino empleado como inóculo, se realizó una caracterización microbiológica que incluyó la determinación de la actividad hidrolítica (AH) y la actividad metanogénica (AME) siguiendo los métodos propuestos por Yap et al., (2018) y Astals et al., (2015).

3.3. Fase 3: Evaluación de la dilución sobre la biodegradabilidad anaerobia del mucílago de cacao

Con el propósito de identificar el efecto de la dilución como tratamiento para el proceso anaerobio del

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

mucílago, se llevaron a cabo ocho 8 ensayos de biodegradabilidad anaerobia, con tres réplicas cada uno, utilizando digestores de vidrio de 110 mL. Para asegurar condiciones anaerobias, los digestores fueron purgados con nitrógeno (N_2) y sellados herméticamente con tapones de butilo y agrafes de aluminio. Dada la composición bioquímica del mucílago (sustrato de rápida degradación) se utilizó la RIS de 4 g $SV_{inoculo}/g SV_{sustrato}$, según lo recomendado por Holliger et al., (2016) para sustratos fácilmente degradables. Los ensayos se realizaron a temperaturas de 25°C debido al rango de temperatura óptimo de los cultivos de cacao (Arvelo et al., 2016) y 37°C (condición de control en procesos anaerobios).

Respecto a la concentración del sustrato, se establecieron porcentajes de mucílago (%M) de 100%, 75%, 50% y 25% para cada temperatura mencionada anteriormente. El porcentaje restante, corresponde a la cantidad de agua adicionada para la dilución. La cuantificación del volumen de biogás se llevó a cabo mediante el método manométrico (Hafner et al., 2020) utilizando un transductor de presión y el volumen de biogás se corrigió teniendo en cuenta la producción endógena del inóculo y se expresó en condiciones de presión y temperaturas normales de acuerdo con la ley de gases ideales. La calidad del biogás, en términos de concentración de metano, se determinó mediante cromatografía de gases. Además, se realizó una caracterización fisicoquímica (pH, AGV, ST, AT) al iniciar y finalizar los ensayos de biodegradabilidad, con el fin de evaluar la estabilidad del proceso.

3.3.1. Cinética de producción de metano a partir de mucílago de cacao durante el proceso de dilución

Para realizar el ajuste del modelo cinético para el tratamiento de dilución de mucílago de cacao se tuvieron en cuenta los modelos y las ecuaciones (Ec. 3) y (Ec. 4) presentadas en la sección *Cinética de producción de metano*.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

3.4. Fase 4. Estimación del potencial de biometanización para la co-digestión anaerobia del mucílago de cacao con estiércol bovino

3.4.1. Diseño de experimentos

Para determinar el efecto de la CoDA sobre el rendimiento de metano de mucílago de cacao con estiércol bovino se implementó un diseño experimental factorial 2^3 aumentado con punto central en duplicado y puntos axiales como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2.

Diseño de experimentos para el tratamiento por CoDA.

N°	Condiciones		
	T[°C]	RIS	fM
1	21	3	0.5
2	25	2	0.2
3	25	2	0.8
4	25	4	0.2
5	25	4	0.8
6	31	3	0
7	31	3	0.5
8	31	3	0.5
9	31	3	1
10	31	1.3	0.5
11	31	4.7	0.5
12	37	2	0.2
13	37	2	0.8
14	37	4	0.2
15	37	4	0.8
16	41	3	0.5

Los factores para estudiar fueron tres: la fracción en sólidos volátiles de mucílago de cacao (fM), la temperatura y la relación inóculo sustrato (RIS). Los niveles alto y bajo para las fracciones de mucílago fueron fM=0.2 y fM=0.8 g SV kg⁻¹, la fracción restante corresponde al co-sustrato (estiércol bovino). Respecto a las temperaturas, los niveles alto y bajo fueron fijados como 25 y 37 °C debido a que la temperatura promedio de producción de cacao y la temperatura óptima del bioproceso es de 37°C. Además, con el fin de estudiar el efecto

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

de la relación inóculo-sustrato (RIS), donde se refiere como sustrato a la mezcla de mucílago y estiércol bovino, se establecieron valores de RIS de 2 y 4 kg $SV_{inóculo}/kg SV_{sustrato}$.

3.4.2. Ensayos de biodegradabilidad anaerobia para la co-digestión

Se llevaron a cabo experimentos de biodegradabilidad anaerobia por triplicado utilizando digestores de vidrio de 110 mL con volumen de trabajo de 60 mL en modo discontinuo, siguiendo el protocolo propuesto por Holliger et al., (2016). Para la preparación del montaje, se agregó un volumen de inóculo de 40 mL en cada digestor, y la cantidad de sustrato a añadido se determinó en función de la RIS. Para garantizar condiciones anaerobias, cada botella fue purgada con nitrógeno (N_2), sellada con tapón de butilo y agrafe de aluminio, y sometida a las condiciones de temperaturas establecidas en el diseño experimental. Además, se realizó un experimento denominado blanco para cuantificar la producción endógena del inóculo y garantizar que la producción de metano estuviera asociada a la degradación del sustrato. Se incluyó un control positivo con celulosa, el cual se espera que su PBM se encuentre en el rango de 352 $NLCH_4 kg^{-1}SV$ y 414 $NLCH_4 kg^{-1}SV$, para validar el correcto funcionamiento del proceso y la calidad del inóculo utilizado (Holliger et al., 2016). La cuantificación del metano en el biogás se llevó a cabo teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la sección *Fase 3: Evaluación de la dilución sobre la biodegradabilidad anaerobia del mucílago de cacao*.

3.4.3. Ajuste modelo cinético en el proceso de co-digestión anaerobia del mucílago de cacao

Para realizar el ajuste del modelo cinético para el tratamiento de co-digestión de mucílago de cacao con estiércol bovino se tuvieron en cuenta las ecuaciones (Ec. 3) y (Ec. 4) presentadas en la sección *Cinética de producción de metano*.

3.4.4. Evaluación de los efectos sinérgicos de las co-digestiones

Las co-digestiones se evaluaron teniendo en cuenta modelos cinéticos empleando el factor de interacción sinérgica que considera el rendimiento y la cinética de producción de metano. Este factor fue calculado siguiendo la metodología propuesta por Sánchez et al., (2021) como se observa en la Tabla 3. La relación entre la sinergia y

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

los parámetros cinéticos permite conocer la interacción de los sustratos, no solamente en función del rendimiento de metano, sino también, con respecto a su tasa degradación y su máxima tasa de producción de metano, logrando ofrecer un panorama más completo de la existencia de sinergia entre ambos sustratos para la investigación de las mezclas sinérgicas en ensayos de laboratorio en operación semicontinua.

Tabla 3.

Ecuaciones aplicadas para evaluar los factores sinérgicos en la co-digestión.

Factor sinérgico		Ecuación	Evaluación
Descripción	Símbolo		
Rendimiento de metano	ϕ_y	$\frac{B_o - B_{o\text{esperado}}}{B_{o\text{esperado}}}$	$\phi_{y,k,R_{max}} > 0$: Existen efectos sinérgicos $\phi_{y,k,R_{max}} < 0$: Existen efectos antagónicos $\phi_{y,k,R_{max}} = 0$: No afecta el rendimiento de los sustratos
Tasa de degradación	ϕ_k	$\frac{k - k_{\text{esperado}}}{k_{\text{esperado}}}$	
Tasa máxima de producción de metano	$\phi_{R_{max}}$	$\frac{R_{max} - R_{max\text{esperado}}}{R_{max\text{esperado}}}$	

Los factores de interacción sinérgica fueron calculados a partir de las curvas predictivas de PBM (B_p) de las co-digestiones, estimadas a partir de las curvas de PBM de los sustratos individuales (B_m) y suponiendo que la producción de metano en la co-digestión sería la producción ponderada de los sustratos individuales. Para todas las mezclas, B_p se calculó como la suma de los productos de la B_m experimental de los sustratos individuales j por su respectiva fracción en SV de la mezcla como se muestra en la (Ec. 5).

$$B_p = \sum_{j=1}^n B_{m,j} \cdot \alpha_j \quad (\text{Ec. 5})$$

El B_o esperado se tomó como el rendimiento de metano de la curva predictiva, mientras que los parámetros cinéticos esperados, R_{max} y k se obtuvieron a partir del ajuste las curvas de PBM a partir de los modelos de Primer Orden y Gompertz modificado frente a los valores de las curvas B_p predictivas. Los valores de

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

B_o , k , R_{max} se calculan a partir de los datos de las curvas de PBM experimentales de cada co-digestión con los modelos.

3.4.5. Generación de superficie de respuesta

Se realizó un análisis estadístico con el propósito de construir una superficie de respuesta para optimizar el proceso de CoDA, considerando las variables de T, RIS y fM. Se tomaron en cuenta tres variables de respuesta: el PBM, que se buscó maximizar para lograr la máxima producción de metano y la Capacidad Buffer junto con el contenido final de AGV, que se buscaron minimizar. Una alta Capacidad Buffer indica la inestabilidad del proceso de digestión y un alto contenido de AGV podría resultar en acumulación y afectar adversamente el proceso. Como estadísticos de error se tuvieron en cuenta el R^2 para verificar el correcto ajuste de las ecuaciones de regresión a los datos experimentales y la deseabilidad obtenida mediante las condiciones dadas mediante el punto óptimo.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

4. Resultados**4.1. Revisión bibliográfica**

De la revisión bibliográfica se obtuvieron 36 artículos relacionados con el proceso de DA donde se emplean residuos de cacao para la producción de biogás. Las características de los artículos fueron: i) relacionados con el tema de interés “cacao” y “digestión anaeróbica”, se evidenció que la cantidad de publicaciones donde se gestiona el mucílago de cacao a través de la DA es limitada ($n=0$) y las investigaciones son recientes (2015-2023); ii) la mayoría de artículos han sido publicados en la revista *Chemical Engineering Transactions* ($n=5$), lo cual relaciona a sus altos estándares de calidad e impacto en la investigación; y iii) la afiliación de los autores de estos artículos está concentrada en Colombia ($n=14$), teniendo en cuenta que es un país que cuenta con estos cultivos.

En el APÉNDICE A se detallan los resultados obtenidos de los artículos que reportan operación en batch, teniendo en cuenta que es el tipo de operación implementado para el desarrollo experimental. La información presentada detalla los tratamientos aplicados a los sustratos, temperatura, volumen del reactor, inóculo utilizado y rendimientos reportados de biogás o biometano. De acuerdo con los resultados obtenidos se resalta que en la mayoría de los estudios sobre la producción de biogás a partir de residuos de la agroindustria cacaofera se emplearon tratamientos de reducción del tamaño y CoDA, y el rango de temperatura mesofílico predomina.

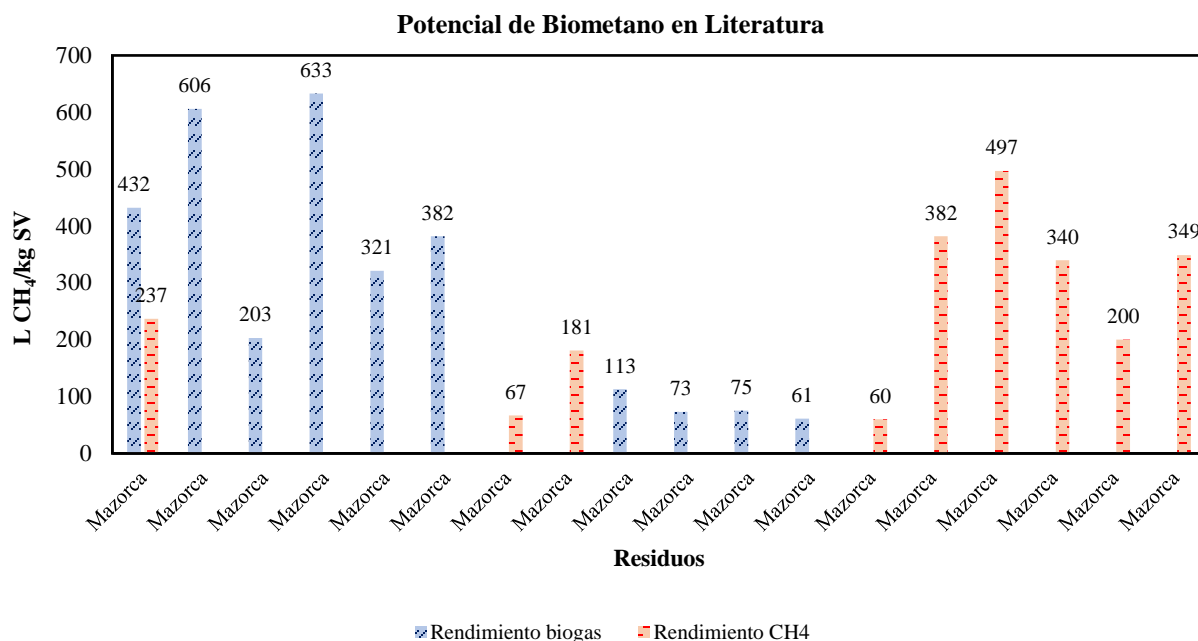
En la Figura 1 se presentan, en la ordenada, los rendimientos de biogás y biometano reportados en la literatura para la DA de residuos de cacao, con valores que oscilan entre 61 a 633 L kg⁻¹SV para biogás y 60 a 497 L CH₄ kg⁻¹ SV para biometano. En la abscisa se muestra el sustrato utilizado en cada experimento, evidenciando que las investigaciones sólo han estudiado el tratamiento de la mazorca de cacao. Se observa que la monodigestión de la mazorca de cacao presenta un rendimiento de 382 L CH₄/kg SV. Sin embargo, al realizar CoDA con estiércol porcino y residuos sólidos urbanos el rendimiento se incrementa a 497 L CH₄ kg⁻¹ SV; permitiendo identificar que los cosustratos aportan nutrientes al proceso que la mazorca no posee, además de

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

ofrecer un efecto buffer durante el proceso. Cabe resaltar que en ambos casos se utilizó como tratamiento la reducción de tamaño de partícula menor o igual a 0.5 mm

Figura 1.

Rendimientos de biogás y metano para residuos en la industria del cacao según la literatura



En las investigaciones sobre la DA de residuos de cacao, se observa una brecha en la literatura en relación con el tratamiento del mucílago como sustrato, debido al enfoque predominante en mazorca como se evidencia en la Figura 1. Por lo tanto, en la Tabla 4 se presenta una matriz de decisión de análisis cualitativo para determinar los tipos de tratamientos aplicables en la DA, con el propósito de seleccionar aquellos que son más adecuados para los ensayos de biodegradabilidad anaerobia del mucílago de cacao. Para ello, se definieron criterios de decisión para cada tratamiento, considerando el costo de implementación, la complejidad técnica, la capacidad de escalabilidad en la industria, el tiempo requerido para su realización y el potencial de generación de biometano. Cada criterio fue evaluado con una calificación de bajo, medio o alto. Tras evaluar estos criterios junto con las características fisicoquímicas del mucílago, se determinó que los tratamientos más adecuados para implementar son la dilución y la co-digestión.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Tabla 4.*Matriz de decisión para los tratamientos aplicables a la DA de residuos del cacao.*

Tratamientos aplicables a la DA						
Tipo	Descripción	Costo de implementación	Complejidad técnica	Capacidad de escalabilidad	Tiempo Implementación	Potencial de generación de biometano
Biológico	Uso de hongos	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto
	Adición de enzimas	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto
	Co-digestión anaeróbica (CoDA)	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto
Químico	Adición de compuesto alcalino	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio
	Adición de ácidos para aumentar la degradación y reducir tiempo de digestión	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Medio
Físico	Dilución para disminuir concentración de compuestos tóxicos	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Medio
	Disminución del tamaño de partícula del sustrato	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio
	Placas de colisión para reducir los tiempos de retención hidráulico	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio
Térmico	Exposición a altas temperaturas y presión para inducir la hidrólisis	Alto	Alto	Bajo	Medio	Bajo
	Digestión en fases de temperatura en condiciones termófilas y mesófilas	Alto	Alto	Bajo	Medio	Bajo

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

4.2. Evaluación del inóculo y caracterización de los sustratos**4.2.1. Caracterización del mucílago de cacao (sustrato), estiércol bovino (co-sustrato) y el lodo de estiércol bovino empleado como inóculo**

En la Tabla 5 se presenta la caracterización fisicoquímica del sustrato, co-sustrato utilizados e inóculo, así como la composición del mucílago de cacao. También se incluye la caracterización microbiológica del inóculo para evaluar su calidad.

Tabla 5.

Caracterización del mucílago de cacao (sustrato), estiércol bovino (co-sustrato) y el lodo de estiércol bovino empleado como inóculo.

Parámetro	Mucílago	Estiércol	Inóculo	Unidad
SV	161.4 ± 1.613	153.55 ± 1.144	34.825±0.587	g kg ⁻¹
ST	174.06 ± 0.558	171.68 ± 3.164	48.737±1.015	g kg ⁻¹
DQO _T	129.333 ± 6.128	25.667 ± 0.471	-	mg DQO L ⁻¹
DQO _s	70.417 ± 4.125	2.083 ± 0.118	-	mg DQO L ⁻¹
pH	3.52 ± 0.01	7.37	7.44±0.07	-
AGV	10240 ± 69.282	600	440 ± 183.3	mg CH ₃ COOH L ⁻¹
AT	3566.67±57.735	1100	3100	mg CaCO ₃ L ⁻¹
AGV/AT	2.872 ± 0.07	0.55	0.4	mg CH ₃ COOH mg CaCO ₃ ⁻¹
AME	-	-	0.081 ± 0.002	g DQO CH ₄ L ⁻¹
AH	-	-	0.086±0.004	g DQO CH ₄ L ⁻¹
Proteína cruda	3.75 ± 0.097	-	-	g kg ⁻¹
Grasa cruda	2.3 ± 0.133	-	-	g kg ⁻¹
Celulosa	16.02	-	-	g kg ⁻¹
Hemicelulosa	2.59	-	-	g kg ⁻¹
Azúcares reductores	100.82 ± 1.56	-	-	g kg ⁻¹
Sacarosa	44 ± 2.04	-	-	g kg ⁻¹
Lignina	18.1	-	-	g kg ⁻¹
Cenizas	15.8 ± 3.375	-	-	g kg ⁻¹
Nitrógeno Total	0,6 ± 0.156	-	-	g kg ⁻¹
Fósforo total	0.1 ± 0.019	-	-	g kg ⁻¹
Azufre total	0.1 ± 0.019	-	-	g kg ⁻¹
Humedad	83.8 ± 0.150	-	-	% p/p
Relación C/N	72.67	-	-	-
Formula empírica	C _{760,9} H ₁₄₉₁ O _{738,9} N	-	-	-

El lodo digerido de estiércol bovino puede ser empleado adecuadamente como inóculo, debido a que los valores resultantes se sitúan dentro de los rangos recomendados y reportados en la literatura. El pH se encuentra en el rango óptimo de 7-8.5, con un contenido de AGV por debajo de 1000 mg CH₃COOH L⁻¹, valores recomendados

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

según Holliger et al., (2016). Además, la AME es de 0.081 ± 0.002 g DQO CH_4 L^{-1} , el doble de lo reportado por (L. Castro et al., (2017a) y su actividad hidrolítica es de 0.086 ± 0.004 g DQO CH_4 L^{-1} . La producción de metano del control de celulosa estuvo dentro del rango para la validación del buen funcionamiento del inóculo (352-414 NL CH_4 kg^{-1} SV), el valor obtenido para el PBM de la celulosa fue de 355.569 ± 16 NL CH_4 kg^{-1} SV. Estos resultados sugieren que el inóculo empleado para el desarrollo experimental es de buena calidad debido a su capacidad para promover la producción de biogás (L. Castro et al., 2017b).

El mucílago de cacao utilizado como sustrato presenta un pH de 3.52, similar al reportado por Balladares et al., (2016), lo cual está fuera del rango de operación óptimo para el desarrollo de la DA (Parra, 2015). Además, el contenido de ST supera el límite recomendado de >150 g kg^{-1} según Park et al., (2018) para este proceso. Asimismo, se identifica una relación C/N de 72.67, que está por encima del rango recomendado (25-30) (Kondusamy & Kalamdhad, 2014; Rodríguez et al., 2017a). Se destaca la alta cantidad de carbohidratos en forma de azúcares presentes en el mucílago (Gutiérrez & Gomero, 2020), con valores de azúcares reductores y la sacarosa de 100.82 ± 1.56 , g kg^{-1} y 44 ± 2.04 g kg^{-1} , respectivamente. Además, el mucílago de cacao cuenta con un elevado contenido de AGV de 10240 ± 69.282 mg CH_3COOH L^{-1} . Estos resultados muestran que el sustrato no presenta condiciones apropiadas para el proceso anaeróbico, ya que la alta concentración de azúcares y el contenido de AGV en la materia orgánica lo convierten en sustrato rápidamente biodegradable, lo que podría llevar a la inhibición del proceso por acidificación. Por lo tanto, es esencial aplicar un tratamiento adecuado para garantizar digestión efectiva del mucílago.

El estiércol bovino utilizado como co-sustrato presenta una cantidad significativa de sólidos, con valores cercanos a los reportados por Castro-Molano et al., (2019), siendo de 171.68 ± 3.164 g ST kg^{-1} y 153.55 ± 1.144 g SV kg^{-1} . Además, su pH es básico, con un valor de 7.37, y muestra una capacidad buffer de 0.55 mg CH_3COOH mg^{-1} de CaCO_3 , indicando una efectiva capacidad amortiguadora al proceso.

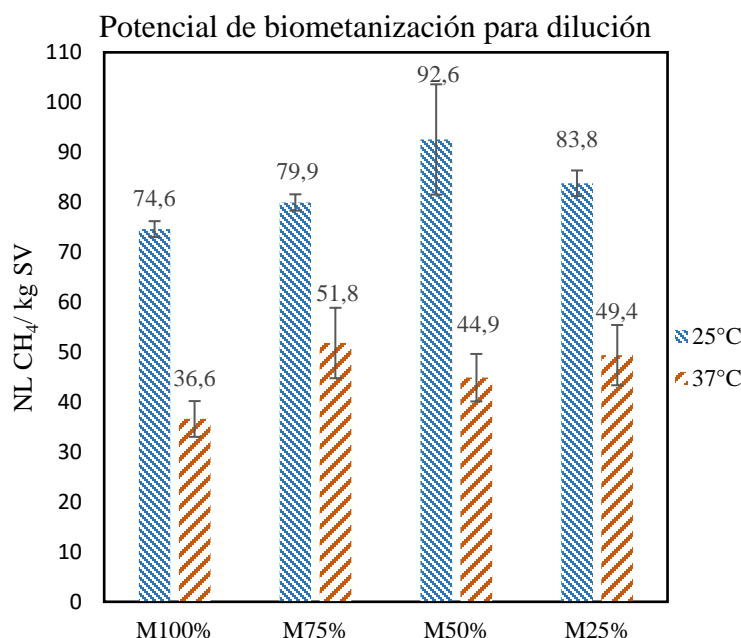
EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

4.3. Evaluación de la dilución del mucílago de cacao sobre la producción de metano**4.3.1. Potenciales de biometanización para mucílago de cacao diluido**

En la Figura 2 se presentan los rendimientos de producción de metano para el tratamiento de dilución del mucílago a una temperatura de 25°C y 37°C. La experimentación tuvo una duración total de 8 días.

Figura 2.

Potencial de biometanización acumulado para dilución a RIS de 4 a T de 25 y 37 °C.



El tratamiento de dilución para las dos temperaturas de operación fue favorable. Todos los experimentos que utilizaron mucílago diluido reportaron potenciales de biometanización superiores al experimento control (M100%). El experimento con la mayor producción de metano registró 92.6 ± 11.044 NL CH₄ kg⁻¹ SV a la temperatura de 25°C, con mucílago diluido al 50%. Este rendimiento fue 24.13% superior comparado con el mucílago sin diluir a 25°C, lo que demuestra que la dilución es un tratamiento efectivo para aprovechar el carbono presente en el mucílago y transformarlo a metano. Asimismo, la adición de agua al sustrato mejora la

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

biodisponibilidad de nutrientes para la digestión de los microorganismos y permite prevenir la inhibición del sistema al disminuir la concentración de AGV en el proceso (Mendieta et al., 2020). No obstante, este mismo experimento obtuvo un rendimiento 75.7% por debajo del PBM teórico del mucílago de cacao (381 NL CH₄/kg SV), con lo cual se puede inferir que, aunque los rendimientos en el tratamiento de dilución son superiores al control, la dilución requiere de un co-sustrato que permita mejorar la producción de biometano.

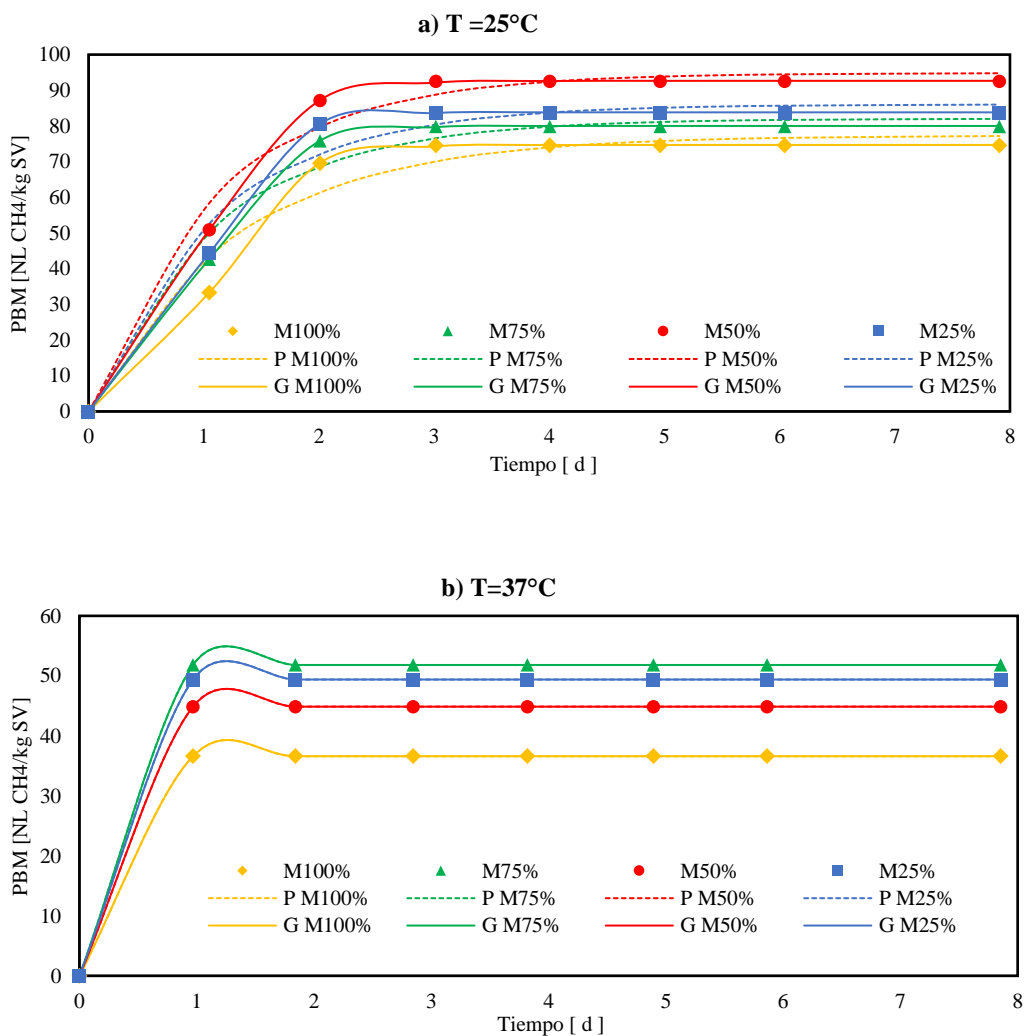
Los experimentos realizados a temperatura de 37°C presentaron producciones de metano inferiores respecto a las alcanzadas a temperatura de 25°C. Este comportamiento se atribuye a la relación directa entre el aumento de temperatura y la velocidad de fermentación de los azúcares presentes en el sustrato, lo que conlleva a la rápida producción y acumulación de AGV en el sistema, resultando en rendimientos de metano más bajos. Es por ello por lo que, al disminuir la temperatura, la capacidad del sistema para transformar en metano los AGV producidos es mayor, dado que su generación es más lenta.

En la Figura 3 se presenta la producción acumulada de metano en función del tiempo para diferentes mezclas de mucílago a 25°C y 37°C con ajuste de datos experimentales al modelo Primer Orden y Gompertz Modificado.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Figura 3.

Producción acumulada de metano para DA de mucilago a diferentes diluciones.



Nota. P (Modelo cinético Primer Orden) y G (Modelo cinético Gompertz Modificado).

A 25°C se observa que la producción máxima de metano se alcanza alrededor del día 3 para todas las mezclas, mientras que, a 37°C, dicha producción máxima se logra en el primer día, indicando una cinética más rápida debido al incremento de temperatura (Mao et al., 2015). Esto se confirma con la constante de hidrólisis obtenida mediante el ajuste cinético de Primer Orden. A 25°C, el valor de k oscila entre 0.78 a 0.91 d⁻¹, mientras

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

que, a 37 °C, los valores alcanzan entre 11.11 a 12.66 d⁻¹, indicando un incremento en la velocidad de degradación del sustrato al aumentar la temperatura.

Además, la implementación de los modelos cinéticos a los datos experimentales demostró un adecuado ajuste, con coeficiente de determinación de R² igual a 1 para Gompertz Modificado y 0.98 para Primer Orden, a temperatura de 25°C. Para la temperatura de 37°C, ambos modelos tuvieron un R² igual a 1 (APÉNDICE B)

4.3.2. Estabilidad del proceso de dilución

En la Tabla 6 se presentan los indicadores de falla de un proceso de DA en operación batch.

Tabla 6.

Indicadores de falla para el proceso de DA en operación Batch

Parámetro	Rango óptimo	Unidades	Referencia
pH	6.5 – 8.2	-	Kondusamy & Kalamdhad, (2014)
AGV	<4000	mg CH ₃ COOH L ⁻¹	A. Campos, (2001)
AT	<6500	mg CaCO ₃ L ⁻¹	Parra, (2015)
AGV/AT	0.2 – 0.8	mg CH ₃ COOH mg ⁻¹ CaCO ₃	Callaghan et al., (2002)
CH ₄	50 - 70	%	Lorenzo & Obaya, (2005)

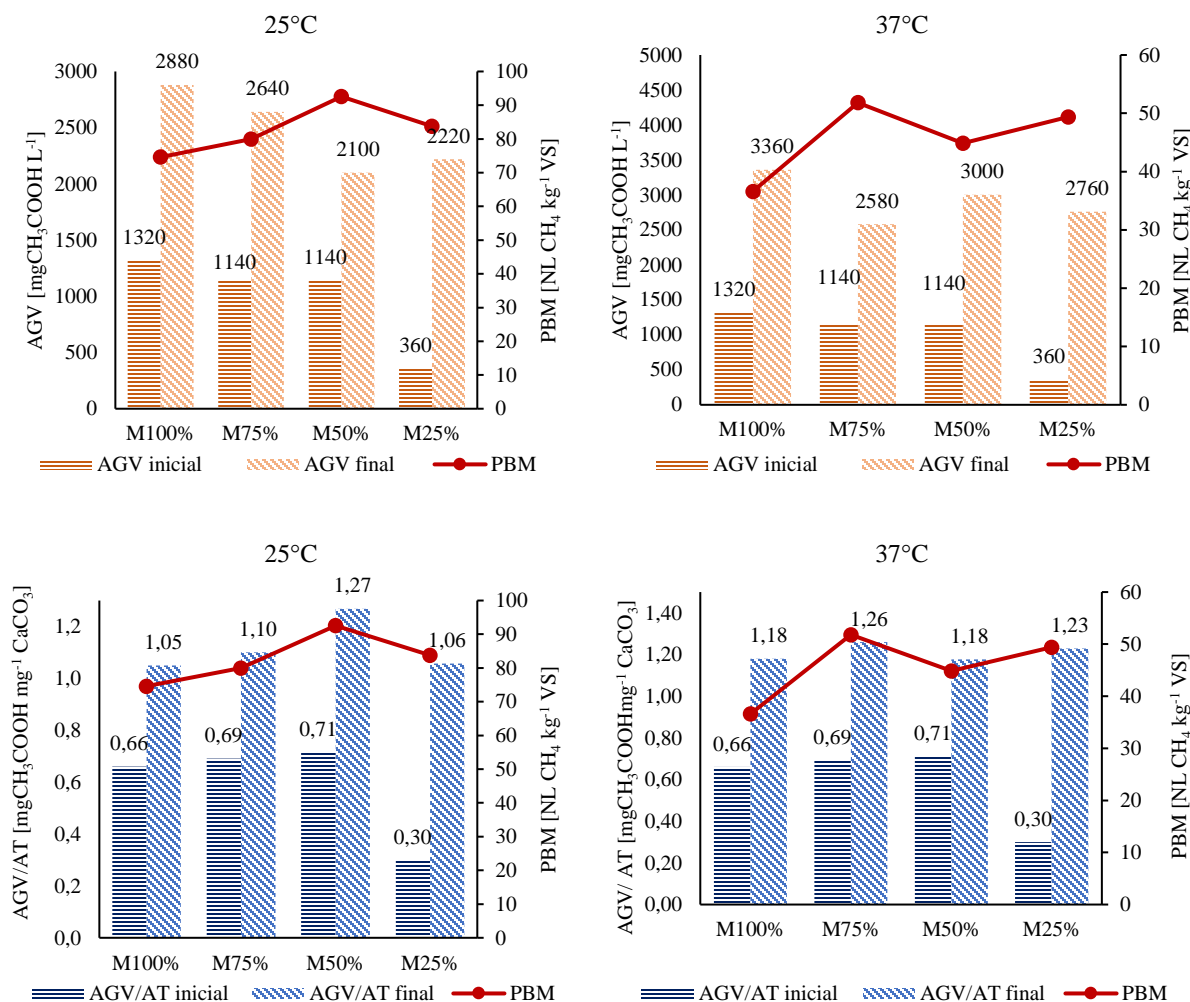
La concentración de AGV al final de cada ensayo (Figura 4) a 25 °C varió entre 2100 a 2880 mg CH₃COOH L⁻¹, mientras que a 37 °C esta concentración osciló entre 2580 a 3360 mg CH₃COOH L⁻¹. Estos valores se sitúan por debajo del límite de falla presentado en la Tabla 6. Se observa que, en los experimentos a ambas temperaturas, una mayor concentración final de AGV resulta en una menor producción de metano. Por consiguiente, según los rangos mencionados, la concentración final de AGV para los experimentos a 37°C es más elevada en comparación con los realizados a 25°C, lo que conlleva a menores producciones de metano. Estos se correlacionan con los resultados discutidos previamente.

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Al analizar la relación entre AGV/AT (capacidad buffer) (Figura 4), los valores finales oscilaron entre 1.05 a 1.27 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃ para los experimentos a 25 °C, y entre 1.18 a 1.26 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃ para los experimentos a 37 °C, superando el límite de falla, lo cual indica un desequilibrio en el proceso.

Figura 4.

Comportamiento inicial y final de AGV, Capacidad Buffer y PBM a temperatura de a)25°C y b)37°C.



La dilución logró ser un tratamiento efectivo pues se obtienen rendimientos de metano superiores al utilizar el sustrato sin diluir, y concentraciones de AGV por debajo del límite de falla para ambas condiciones de temperatura. Sin embargo, en el mejor experimento con 50% de mucílago diluido, se observó una capacidad buffer

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

de 1.27 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃ y un porcentaje de CH₄ del 34.8% indicando inestabilidad en el proceso. Estos valores superan del límite crítico, resultando en desequilibrios en el sistema por lo que lo que se sugiere emplear otro tipo de tratamiento como la co-digestión para aumentar la estabilidad y los rendimientos de metano en el proceso de DA.

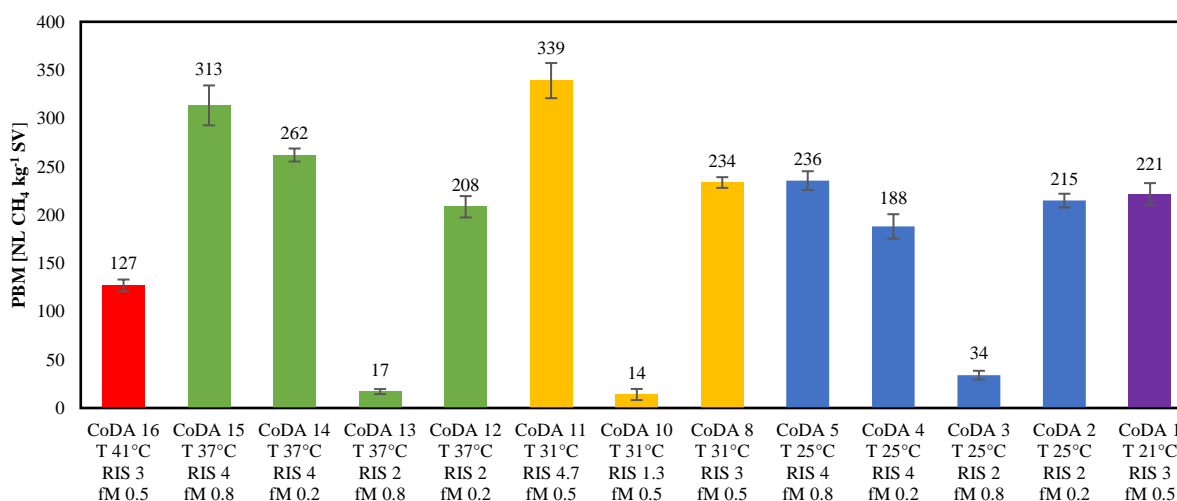
4.4. Estimación del potencial de biometanización en la co-digestión.

4.4.1. Análisis del potencial de biometanización en el proceso de co-digestión

La Figura 5 muestra los PBM para las co-digestiones del mucílago con estiércol bovino en diferentes proporciones de mezcla, temperaturas y RIS. En la abscisa se detallan las condiciones de cada experimento, mientras que en la ordenada se presenta el PBM obtenido. El periodo de experimentación tuvo una duración de 43 días hasta que la producción de CH₄ estuvo por debajo del 1%. Además, en el APÉNDICE C se presentan los valores obtenidos para las monodigestiones de mucílago de cacao y de estiércol bovino.

Figura 5.

PBM de las CoDA (Mucílago-Estiércol Bovino) a diferentes condiciones de RIS, T y fM.



EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Los resultados obtenidos del proceso de co-digestión respaldan la hipótesis de que sustratos como el mucílago de cacao (rápidamente biodegradable), requieren que el proceso anaerobio se realice a RIS superiores a 2. En los puntos axiales de la RIS se obtuvieron los mayores y menores rendimientos CoDA 11 ($fM=0.5$, $T=31^{\circ}C$, $RIS=4.7$) y la CoDA 10 ($fM=0.5$, $T=31^{\circ}C$, $RIS=1.3$) con 339 ± 18.19 y 14 ± 5.74 NL CH_4 kg^{-1} SV, respectivamente. Sin embargo, la literatura recomienda que la máxima relación inóculo/sustrato a evaluar sea de 4 y la mínima RIS de 2 (Raposo et al., 2020). Por lo anterior, se excluyeron estos experimentos del análisis de resultados.

Los resultados indican que con un valor adecuado de RIS (> 2), el carbono proveniente del mucílago de cacao es aprovechable eficazmente para transformarse en metano. El mejor rendimiento de metano se alcanzó con el experimento CoDA 15 (313 ± 20.64 NL CH_4 kg^{-1} SV), el cual presenta las mejores condiciones del proceso anaerobio $37^{\circ}C$, RIS de 4 y fM de 0.8. El rendimiento obtenido está 17.8% por debajo del PBM teórico, demostrando que el mucílago de cacao es un sustrato adecuado para ser tratado por digestión anaerobia.

4.4.2. Estabilidad del proceso en co-digestión

La Tabla 7 presenta las condiciones operativas de cada experimento, incluyendo temperatura, RIS y fracción de mucílago (fM). Además, proporciona el PBM, la concentración de AGV, la capacidad buffer, el pH y el porcentaje de metano ($\% CH_4$) en el día final (día 43) del proceso. Estos parámetros se analizan para evaluar la estabilidad de los experimentos.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Tabla 7.

Parámetros: AGV, Capacidad buffer, pH, %CH₄ y PBM de las co-digestiones a diferentes condiciones experimentales.

ID Mezcla	T [°C]	RIS	fM	PBM [NLCH ₄ kg ⁻¹ SV]	AGV [mg CH ₃ COOHL ⁻¹]	Capacidad Buffer [mg CH ₃ COOHmg ⁻¹ CaCO ₃]	pH	% CH ₄
CoDA 1	21	3	0.5	221	640	0.41	8.64	54.72
CoDA 2	25	2	0.2	215	560	0.33	7.76	55.23
CoDA 3	25	2	0.8	34	3120	1.23	5.24	39.44
CoDA 4	25	4	0.2	188	600	0.40	7.96	54.79
CoDA 5	25	4	0.8	236	800	0.54	7.85	53.57
CoDA 8	31	3	0.5	234	540	0.36	8.23	55.47
CoDA 10	31	1.3	0.5	14	1320	0.68	8.03	62.85
CoDA 11	31	4.7	0.5	339	480	0.34	8.37	54.22
CoDA 12	37	2	0.2	208	720	0.45	8.57	55.05
CoDA 13	37	2	0.8	17	1200	0.94	8.33	66.66
CoDA 14	37	4	0.2	262	640	0.39	7.7	52.44
CoDA 15	37	4	0.8	313	480	0.31	8.16	54.36
CoDA 16	41	3	0.5	127	660	0.40	7.35	63.60

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Todos los experimentos matuvieron los AGV dentro del rango establecido en la Tabla 6, lo que sugiere que no hubo inhibición del proceso por acumulación de estos. En cuanto a la capacidad buffer, el 85% de los experimentos obtuvo valores dentro del rango de estabilidad presentado en la Tabla 6, los cuales oscilan entre 0.31 y 0.54 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃. Únicamente la CoDA 3 y la CoDA 13 obtuvieron un valor por encima del límite con 1.23 y 0.94 respectivamente, indicando inestabilidad en estos experimentos razón por la cual se obtuvieron bajos rendimientos de metano. Por lo tanto, estos se excluyen del análisis de los efectos sinérgicos. Por otra parte, la CoDA 15, que registró el mejor rendimiento de metano (313±20.64 NL CH₄ kg⁻¹ SV) presentó los menores valores de concentración de AGV y capacidad buffer con 480 mg CH₃COOH L⁻¹ y 0.31 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃, respectivamente.

4.4.3. Ajuste cinético de los PBM en co-digestión

Se implementaron los modelos cinéticos de Primer Orden y Gompertz Modificado para caracterizar la cinética de la co-digestión. En el APÉNDICE C se proporcionan los detalles de los parámetros correspondientes a cada experimento de co-digestión, acompañados de los indicadores de ajuste: coeficiente de determinación (R²) y raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE). Además, se incluyen las representaciones gráficas de los ajustes de los modelos a los datos experimentales.

Los valores de R² son cercanos a 1 tanto para el modelo de Primer Orden como para Gompertz Modificado, lo que sugiere un ajuste satisfactorio de ambos modelos a los datos experimentales. Asimismo, los intervalos de RSME para el modelo de Primer Orden oscilan entre 0.47 a 24.24, mientras que para el modelo de Gompertz Modificado van desde 0.47 hasta 25.22.

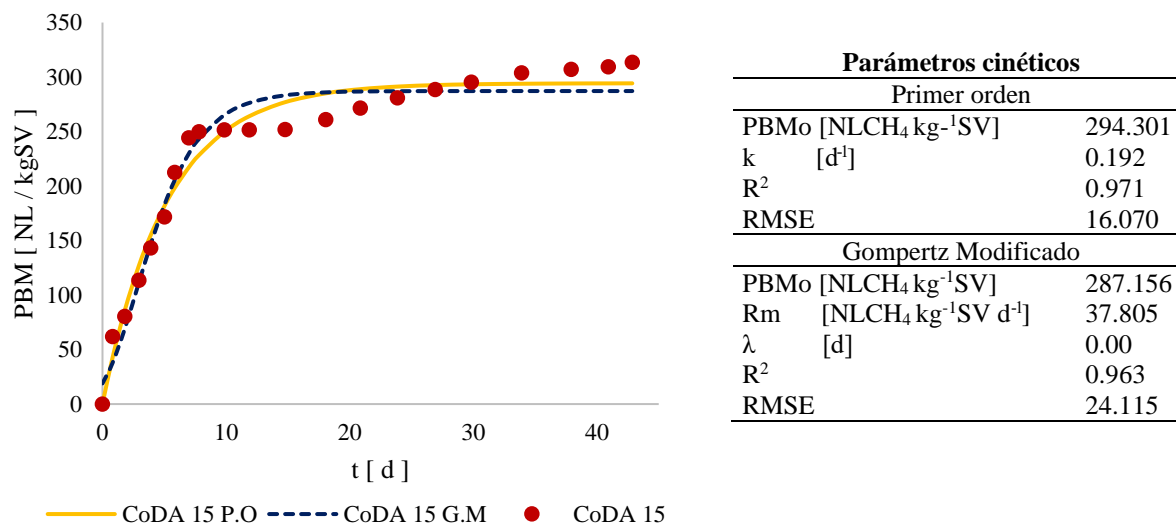
En la Figura 6 se presenta la curva de producción de metano y sus respectivos parámetros cinéticos empleando el modelo de Primer Orden y Gompertz modificado para la CoDA 15. Esta fue la co-digestión que mostró la mayor producción de metano, con un rendimiento de 313±20.64 NL CH₄ kg⁻¹ SV. Esta co-digestión

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

demonstró un ajuste óptimo al modelo de primer orden, evidenciado por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97 y un RSME de 16.07. Además, presentó una tasa de degradación (k) de 0.192 d^{-1} .

Figura 6.

Producción de metano acumulado y parámetros cinéticos para CoDA 15



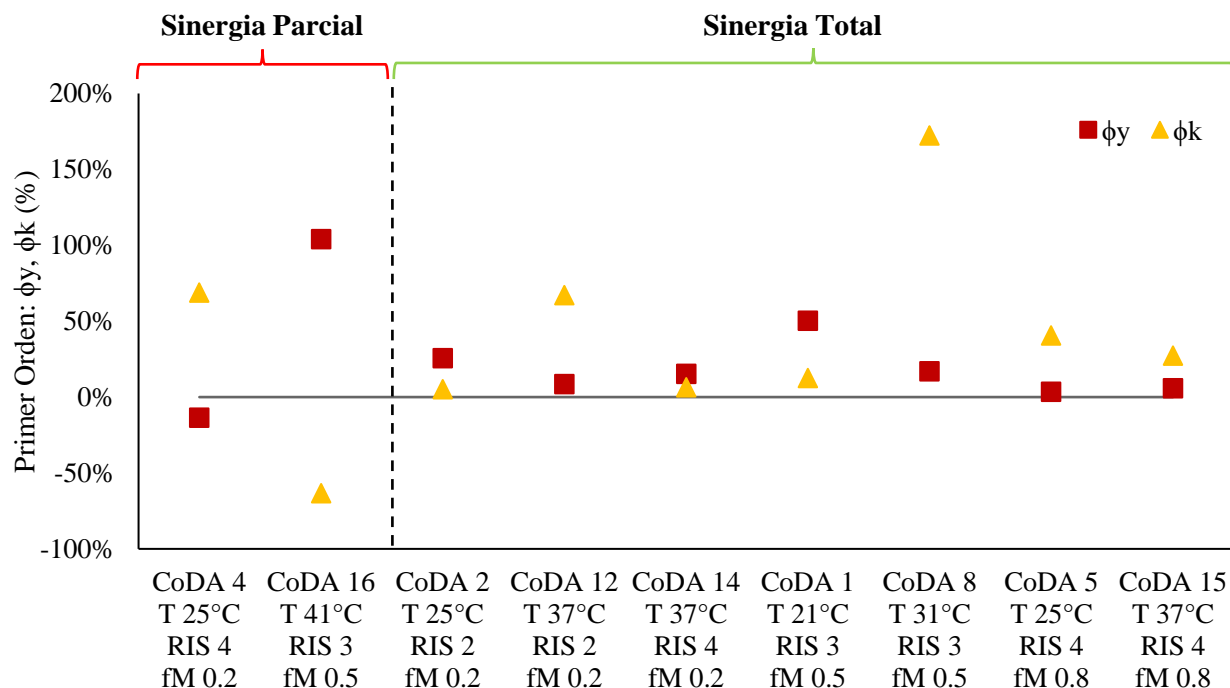
4.4.4. Evaluación de efectos sinérgicos de las co-digestiones

Para la evaluación de los efectos sinérgicos cinéticos de las co-digestiones se implementó el modelo de Primer Orden puesto a que, este posee un mejor ajuste que el modelo de Gompertz Modificado debido a que el sustrato no tiene fase de latencia. Los parámetros obtenidos para calcular los factores sinérgicos cinéticos se detallan en el APÉNDICE C. La Figura 7 muestra en la ordenada los efectos sinérgicos en función del rendimiento de CH₄ (ϕy) y la tasa de degradación (ϕk), y en la abscisa los experimentos. En cuanto a la sinergia cinética, se observaron efectos antagónicos en algunos experimentos (lado izquierdo de la Figura 7). No obstante, la mayoría de los experimentos presenta sinergia total (lado derecho de la Figura 7).

Figura 7.

Efectos sinérgicos de la co-digestión de mucílago y estiércol bovino con ajuste de modelo de Primer Orden

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS



Los resultados presentados en la figura anterior muestran 2 experimentos (CoDA 4 y 16) presentaron sinergia parcial, donde uno de los factores dio un efecto negativo. Por otra parte, 7 co-digestiones obtuvieron sinergias positivas totales ($\phi_y, \phi_k > 0$), con rangos entre 3% a 50% para ϕ_y y ϕ_k entre 5% y 172%. El experimento CoDA 1 presentó mayor sinergia (50%) en función del factor ϕ_y que corresponde a la sinergia con respecto al rendimiento de metano y el experimento CODA 8 presentó la mayor sinergia (172%) en función del factor ϕ_k que corresponde a la tasa de degradación. Los porcentajes de sinergia para los factores ϕ_y y ϕ_k menores al 10% se consideran no significativos en el proceso de digestión anaeróbica. (Donoso-Bravo et al., 2019). Por lo anterior, únicamente la CoDA 1, con 50% en ϕ_y y 13% en ϕ_k , y la CoDA 8 con 17% en ϕ_y y 172% en ϕ_k , obtuvieron sinergias totales significativas.

4.4.5. Efecto de las variables en la producción de metano

Se realizaron tres regresiones de superficie de respuesta mediante las cuales se relacionan los efectos lineales, cuadráticos y de interacción entre las variables RIS, T y fM sobre: la producción de metano en la (Ec. 6), la concentración final de AGV en la (Ec. 7) y la capacidad buffer final en la (Ec. 8). Los ajustes cuadráticos (R^2)

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

de cada regresión fueron de 93.08%, 89.26% y 94.50% respectivamente, indicando que se ajustaron correctamente a los datos experimentales.

$$\begin{aligned} \text{PBM} = & -76 + 25.7 * T - 15 * \text{RIS} - 596 * \text{fM} - 0.593 * T^2 - 19.7 * \\ & \text{RIS}^2 - 92 * \text{fM}^2 + 3.65 * T * \text{RIS} - 0.5 * T * \text{fM} + 196.3 * \text{RIS} * \text{fM} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\begin{aligned} \text{AGV} = & 3052 - 101 * T - 1405 * \text{RIS} + 6832 * \text{fM} + 1.10 * T^2 + 125 * \\ & \text{RIS}^2 + 3454 * \text{fM}^2 + 30.8 * T * \text{RIS} - 169.4 * T * \text{fM} - 1250 * \text{RIS} * \text{fM} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\begin{aligned} \text{C. Buffer} = & 0.60 - 0.0156 * T - 0.288 * \text{RIS} + 2.39 * \text{fM} + 0.00046 * T^2 + \\ & 0.0523 * \text{RIS}^2 + 1.346 * \text{fM}^2 + 0.00282 * T * \text{RIS} - 0.0583 * T * \text{fM} - 0.469 * \\ & \text{RIS} * \text{fM} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 8})$$

Mediante las ecuaciones mencionadas, se determinaron las condiciones óptimas a las cuales se maximiza el PBM y se minimizan los AGV y la capacidad buffer obteniendo un punto óptimo a condiciones de RIS de 4.7, temperatura de 35.7 °C y fM de 0.8, el cual teóricamente llega a un rendimiento de metano de 380 NL CH₄ kg⁻¹ SV, AGV de 317 mgCH₃COOH L⁻¹ y capacidad buffer de 0.26 mg CH₃COOH mg⁻¹ CaCO₃. Sin embargo, la literatura recomienda que la máxima RIS a evaluar sea de 4 (Raposo et al., 2020). De acuerdo con lo anterior, se decidió restringir la RIS hasta un máximo valor de 4 y se obtuvo un nuevo punto óptimo a condiciones de RIS de 4, temperatura de 34.4°C y fM de 0.72 alcanzando una deseabilidad de 0.97, el cual teóricamente alcanza un PBM de 310 NL CH₄/kg SV, AGV de 418 mgCH₃COOH L⁻¹ y capacidad buffer de 0.31 mgCH₃COOH mg⁻¹CaCO₃.

En la Tabla 8 se presentan los puntos óptimos obtenidos descritos anteriormente y sus resultados teóricos.

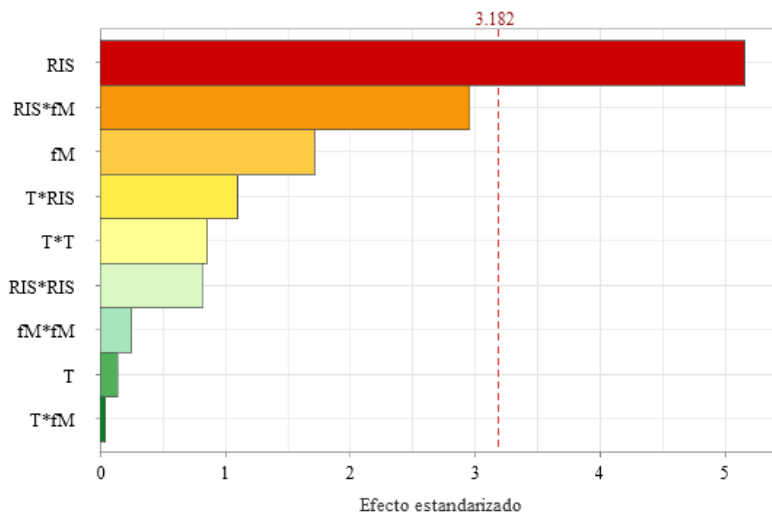
EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Tabla 8.*Condiciones y resultados teóricos del punto óptimo*

Punto Óptimo					
T [°C]	RIS	fM	AGV [mgCH ₃ COOHL ⁻¹]	AGV / AT [mgCH ₃ COOHmg ⁻¹ CaCO ₃]	PBM [NLkg ⁻¹ SV]
35.7	4.7	0.8	317	0.26	380
34.4	4	0.72	418	0.31	310

Por otra parte, se generó un diagrama de Pareto como se muestra en la Figura 8, con una significancia de 0.05, con el objetivo de evaluar el efecto lineal, cuadrático y de interacción entre las variables sobre el proceso de CoDA. De acuerdo con esto, se pudo observar que la RIS es la variable que mayor efecto tiene sobre el proceso, ya que es la única que supera el punto crítico establecido en 3.182. Seguida de esta variable, la interacción entre RIS y la fM, contribuye sobre el proceso con un efecto mucho mayor en comparación con las demás variables o interacciones, no obstante, la contribución de esta no sobrepasa el punto crítico. Con base en lo anterior, manipular principalmente la RIS o la interacción entre la RIS y la fM, generan los mayores cambios en el rendimiento de metano en la CoDA del mucílago de cacao con estiércol bovino.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

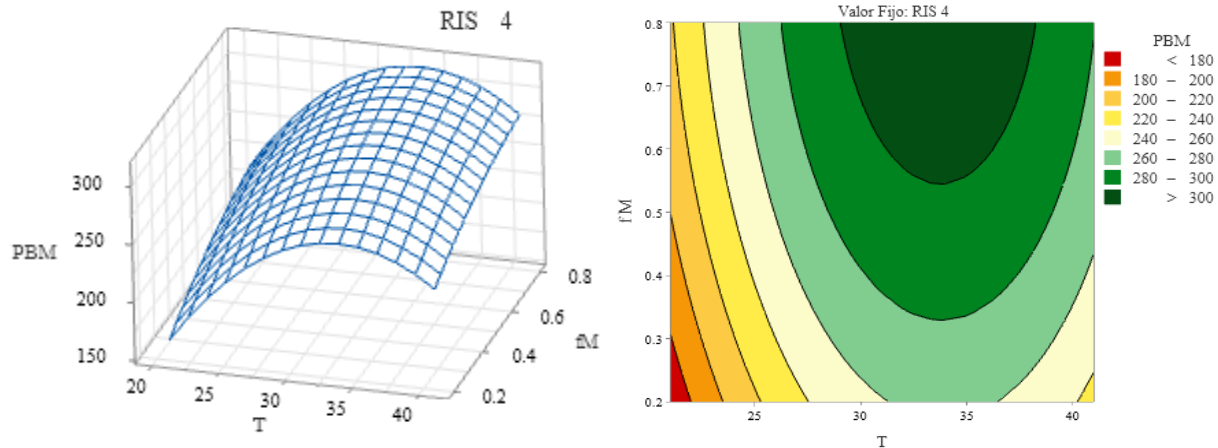
Figura 8.*Diagrama de Pareto.*

En la Figura 9 se presenta la superficie de respuesta generada mediante la (Ec. 6) y un gráfico de contorno, ambas manteniendo fija la RIS en un valor de 4. De acuerdo con el comportamiento de la superficie, el aumento de la temperatura hasta aproximadamente los 35°C ocasiona un aumento en el PBM, por encima de esta, los valores de rendimiento de metano comienzan a disminuir. Respecto a la fM, se observa que al aumentar se incrementan los valores de PBM. Por otra parte, en la gráfica de contorno se observan las regiones correspondientes a la producción de metano en función de la fM y la T. La región de mayor producción está aproximadamente a una temperatura entre 30 y 37 °C y una fM entre 0.6 y 0.8.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Figura 9.

Superficie de respuesta y gráfico de contorno a RIS fija de 4.

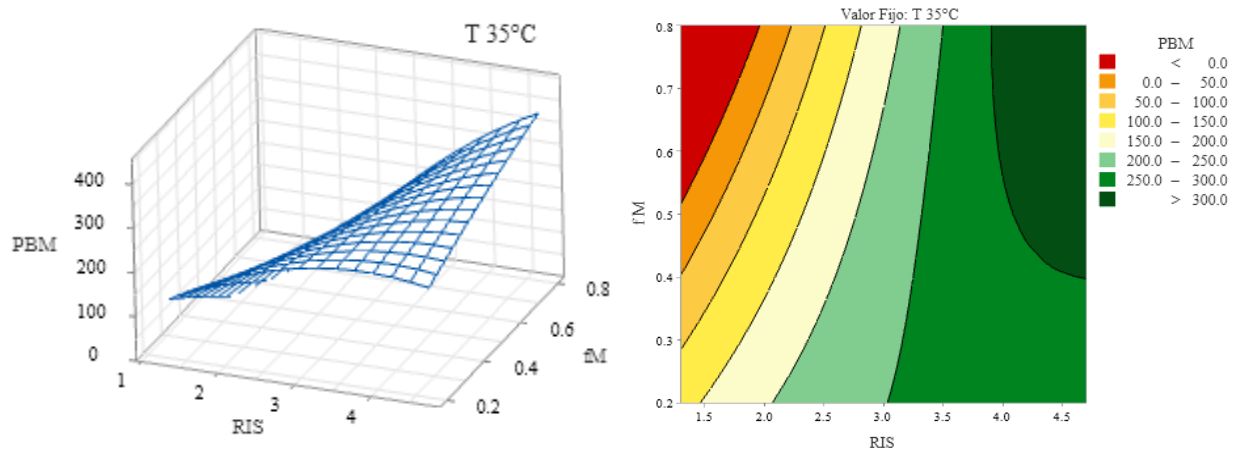


Por otra parte, en la Figura 10 se generó una superficie de respuesta y una gráfica de contorno manteniendo un valor fijo de temperatura a 35°C, con el fin de observar el comportamiento del PBM variando únicamente la fM y la RIS. De manera general, el aumento de la RIS junto al aumento de la fM afecta positivamente los rendimientos de metano, así mismo, al disminuir la RIS y mantener valores altos de fM se puede observar una disminución bastante pronunciada en la superficie indicando la poca producción de metano. Mediante la gráfica de contorno, el rango de producción de metano más alto (verde oscuro) se da aproximadamente entre una fM de 0.4 a 0.8 y una RIS mayor o igual a 4 y el menor (rojo) se encuentra a fracciones menores a 0.4 en conjunto con una RIS por debajo de 2.5.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Figura 10

Superficie de respuesta y gráfico de contorno manteniendo fija la temperatura



EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

5. Conclusiones

- El tratamiento de dilución de mucílago de cacao se muestra positivo para mejorar los rendimientos de producción de metano en el proceso anaerobio. Los experimentos realizados a diferentes condiciones de temperatura demostraron que la dilución incrementa la producción de metano en comparación con el uso del mucílago sin diluir (M100%).
- El tratamiento por co-digestión del mucílago de cacao con estiércol bovino mejora la biodegradabilidad de este residuo, pues permite equilibrar nutricionalmente el sistema y aporta estabilidad al proceso. Además, se identificó que la variable más influyente en la co-digestión anaeróbica del mucílago de cacao con estiércol bovino es la RIS.
- Los modelos de Primer Orden y Gompertz Modificado permiten describir correctamente los datos experimentales mediante los parámetros cinéticos. Así mismo, la sinergia obtenida en función de estos permitió conocer si el mucílago de cacao con el estiércol bovino obtiene sinergias de rendimiento de metano y tasa de degradación, ofreciendo un panorama general de proceso de co-digestión anaeróbica de los sustratos. Se obtuvo sinergia total entre el mucílago de cacao y el estiércol en la mayoría de los experimentos, y significativa a condiciones de 21°C y 31°C, RIS de 3 y fM de 0.5.

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Recomendaciones

Este trabajo de investigación sienta las bases para el aprovechamiento del mucílago de cacao, un residuo actualmente poco estudiado en el proceso de digestión anaerobia (DA). Los hallazgos sugieren la necesidad de explorar la utilización de diferentes co-sustratos con el objetivo de optimizar la eficiencia en la producción de biogás a partir del mucílago de cacao, así como lograr un equilibrio adecuado en el sistema de DA. Adicionalmente, se recomienda evaluar tanto el punto óptimo obtenido mediante la superficie de respuesta, así como, la viabilidad de la co-digestión del mucílago con estiércol bovino en digestores anaerobios semicontinuos.

Bibliografía

- Acosta, N., Duh Kang, I., Rabaey, K., & De Vrieze, J. (2021a). Cow manure stabilizes anaerobic digestion of cocoa waste. *Waste Management*, *126*, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.010>
- Acosta, N., Duh Kang, I., Rabaey, K., & De Vrieze, J. (2021b). Cow manure stabilizes anaerobic digestion of cocoa waste. *Waste Management*, *126*, 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.010>
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1997). Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. In *Biodegradation* (Vol. 8). Kluwer Academic Publishers.
- Antwi, E., Engler, N., Nelles, M., & Schüch, A. (2019). Anaerobic digestion and the effect of hydrothermal pretreatment on the biogas yield of cocoa pods residues. *Waste Management*, *88*, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.034>
- Arvelo, M. A., Delgado, T., Maroto, S., Rivera, J., Higuera, I., Navarro, A., & Inter-American Institute for Cooperation in Agriculture Oficina en Costa Rica. (2016). *Estado actual sobre la producción, el comercio y cultivo del cacao en América*.
- Astals, S., Tait, S., Batstone, D., & Jensen, P. (2015). *Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity*.
- Balladares, C., Chóez-Guaranda, I., García, J., Sosa, D., Pérez, S., González, J. E., Viteri, R., Barragán, A., Quijano-Avilés, M., & Manzano, P. (2016). Physicochemical characterization of *Theobroma cacao* L. sweatings in Ecuadorian coast. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *28*(10), 741–745. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-02-187>
- Bres, M., Beily, E., & Crespo, D. (2022). *Ensayo potencial bioquímico metanogénico Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas*.

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Buswell, A. M., & Mueller, H. F. (1952). *Mechanism of Fermentation Methane*.

<https://pubs.acs.org/sharingguidelines>

Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., & Forster, C. F. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 27).

Campos, A. (2001). *Optimización de la DA de purines de cerdo mediante co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria* [Tesis Doctoral]. Escola tècnica superior d'Enginyeria Agrària.

Campos, E., Palatsi, J., & Illa, J. (2004). *Guía de los tratamiento de las deyecciones ganaderas*. <http://www.arc-cat.net>

Cárdenas, L., Parra, B., Torres, P., & Vásquez, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95–108.

<https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>

Castro, L. D. P., Vecino-Gutierrez, K. P., Díaz-Moyano, L. J., Jaimés-Estévez, J., & Escalante-Hernández, H. (2018). Lighting the anaerobic digestion process in rural areas: obtainment of struvite from bovine manure digestate.

Revista Colombiana de Biotecnología, 20(2), 78–88.

<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n2.71184>

Castro, L., Escalante, H., Jaimés-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017a). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

Castro, L., Escalante, H., Jaimés-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017b). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

- Dahunsi, S. O., Osueke, C. O., Olayanju, T. M. A., & Lawal, A. I. (2019). Co-digestion of *Theobroma cacao* (Cocoa) pod husk and poultry manure for energy generation: Effects of pretreatment methods. *Bioresource Technology*, 283, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.03.093>
- Donoso-Bravo, A., Ortega, V., Lesty, Y., Bossche, H. Vanden, & Olivares, D. (2019). Addressing the synergy determination in anaerobic co-digestion and the inoculum activity impact on BMP test. *Water Science and Technology*, 80(2), 387–396. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.292>
- Fedecacao. (2021). *FEDECACAO*. <https://www.fedecacao.com.co/post/a%C3%B1o-cacaotero-2020-2021-el-de-mayor-producci%C3%B3n-de-cacao-en-la-historia-de-colombia>
- Franco, M., Ramírez Hernández, M., García Gómez, R. S., Bernal González, M., Espinosa Aquino, B., Solís Fuentes, J. A., & Durán De-Bazúa, C. (2010). *Reaprovechamiento integral de residuos agroindustriales: cáscara y pulpa de cacao para la producción de pectinas agroindustrial residues recycling: cacao shells and pulp reuse for pectins production* (Vol. 1, Issue 2).
- Gutiérrez, R., & Gomero, L. (2020). *Obtención de biogás y abono líquido mediante la descomposición anaeróbica de residuos de la fermentación del mucílago de cacao* [Tesis pregrado]. Universidad Científica del Sur.
- Hafner, S. D., Astals, S., Buffiere, P., Løjborg, N., Holliger, C., Koch, K., & Weinrich, S. (2020). *Calculation of Methane Production from Manometric Measurements* *. <https://www.dbfz.de/en/BMP>
- Hansen, C. L., & Cheong, D. Y. (2019). Agricultural waste management in food processing. In *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* (pp. 673–716). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814803-7.00026-9>
- Hashimoto, A. G. (1989). Effect of Inoculum[Substrate Ratio on Methane Yield and Production Rate from Straw. In *Biological Wastes* (Vol. 28).

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*.
- Ivan, C., María, T., Aura, V., Paola, A., & Mario, H. (2016). Anaerobic co-digestion of organic residues from different productive sectors in Colombia: Biomethanation potential assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 49, 385–390. <https://doi.org/10.3303/CET1649065>
- Jaimes-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022). From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure. *Bioresource Technology Reports*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>
- Jay, D., Cheng, J., Liu, Z., & Gontuphil, J. (2016). *Anaerobic co-digestion of cocoa husk with digested swine manure: evaluation of biodegradation efficiency in methane productivity* (Vol. 18, Issue 4). <http://www.cigrjournal.org>
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Sung, S., Raskin, L., & Khanal, S. K. (2022). Anaerobic co-digestion of various organic wastes: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Bioresource Technology*, 343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126063>
- Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., Astals, S., & Holliger, C. (2020). Power and Limitations of Biochemical Methane Potential (BMP) Tests. *Frontiers in Energy Research*, 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00063>
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. S. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production - A review. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 2, Issue 3, pp. 1821–1830). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.024>

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate Management and Processing Practices: A Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app12189216>
- Lorenzo, Y., & Obaya, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 1, 35–48. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Mansur, D., Tago, T., Masuda, T., & Abimanyu, H. (2014). Conversion of cacao pod husks by pyrolysis and catalytic reaction to produce useful chemicals. *Biomass and Bioenergy*, 66, 275–285. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.065>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 45, pp. 540–555). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mao, C., Xi, J., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2019). Biogas production and synergistic correlations of systematic parameters during batch anaerobic digestion of corn straw. *Renewable Energy*, 132, 1271–1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.009>
- Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabrés, P. (2000). *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.*
- Mendieta, O., Madrigal, G., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020). Sugarcane scum as a novel substrate for rapid biogas production from the non-centrifugal cane sugar agribusiness sector in developing countries. *Bioresource Technology*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122364>
- MinAgricultura. (2021). *CADENA DE CACAO.*

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

- Mosquera, J., Varela, L., Santis, A., Villamizar, S., Acevedo, P., & Cabeza, I. (2020). Improving anaerobic co-digestion of different residual biomass sources readily available in Colombia by process parameters optimization. *Biomass and Bioenergy*, *142*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105790>
- Niembro, A., Vásquez, M., & Sánchez, O. (2010). *Árboles de Veracruz. 100 especies para la reforestación estratégica*.
- Panuccio, M. R., Romeo, F., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2021). Digestate Application on Two Different Soils: Agricultural Benefit and Risk. *Waste and Biomass Valorization*, *12*(8), 4341–4353. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01318-5>
- Park, J. H., Kumar, G., Yun, Y. M., Kwon, J. C., & Kim, S. H. (2018). Effect of feeding mode and dilution on the performance and microbial community population in anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, *248*, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.025>
- Parra, A. (2015). *Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria* (Vol. 10, Issue 2).
- Rangel, C. J., Hernández, M. A., Mosquera, J. D., Castro, Y., Cabeza, I. O., & Acevedo, P. A. (2021). Hydrogen production by dark fermentation process from pig manure, cocoa mucilage, and coffee mucilage. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *11*(2), 241–250. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00618-z>
- Raposo, F., Borja, R., & Ibelli-Bianco, C. (2020). Predictive regression models for biochemical methane potential tests of biomass samples: Pitfalls and challenges of laboratory measurements. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 127). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109890>
- Rodríguez, A., Ángel, J., Rivero, E., Acevedo, P., Santis, A., Cabeza, I., Acosta, M., & Hernández, M. (2017a). Evaluation of the biochemical methane potential of pig manure, organic fraction of municipal solid waste

EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS
and cocoa industry residues in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 55–60.
<https://doi.org/10.3303/CET1757010>

Rodríguez, A., Ángel, J., Rivero, E., Acevedo, P., Santis, A., Cabeza, I., Acosta, M., & Hernández, M. (2017b).
Evaluation of the biochemical methane potential of pig manure, organic fraction of municipal solid waste
and cocoa industry residues in Colombia. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 55–60.
<https://doi.org/10.3303/CET1757010>

Rodríguez, A., Zuleta, J., Garzón, A., Avendaño, S., Alvarez, Y., Cabeza, I., Santis, A., & Acevedo, P. (2018).
Anaerobic co-digestion of pig manure, organic fraction of municipal solid waste, fruit residues of drinks
industry and cocoa residues. *Chemical Engineering Transactions*, 64, 499–504.
<https://doi.org/10.3303/CET1864084>

Rufis, T., Ionel, I., Gabche, S., & Ioan, C. (2019). Experimental biogas production from Cameroon lignocellulosic
waste biomass. In *Article in Journal of Environmental Protection and Ecology*.
<https://www.researchgate.net/publication/336838802>

Sánchez, Z., Poggio, D., Castro, L., & Escalante, H. (2021). Simultaneous synergy in ch₄ yield and kinetics: Criteria
for selecting the best mixtures during co-digestion of wastewater and manure from a bovine slaughterhouse.
Energies, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020384>

Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V. M., Vandenberghe, L. P. S., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B.,
Rogez, H. L. G., Góes Neto, A., & Soccol, C. R. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste
management: A review. In *Waste Management* (Vol. 90, pp. 72–83). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.030>

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

- Vergara-Mendoza, M., Martínez, G. R., Blanco-Tirado, C., & Combariza, M. Y. (2022). Mass Balance and Compositional Analysis of Biomass Outputs from Cacao Fruits. *Molecules*, 27(12). <https://doi.org/10.3390/molecules27123717>
- Villamizar Jaimes, Y., & Rodríguez Guerrero, J. (2016). Caracterización fisicoquímica, microbiológica y funcional de harina de cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad CCN-51. In *Cuaderno Activa N°9*.
- Wang, Z., Jiang, Y., Wang, S., Zhang, Y., Hu, Y., Hu, Z. hu, Wu, G., & Zhan, X. (2020). Impact of total solids content on anaerobic co-digestion of pig manure and food waste: Insights into shifting of the methanogenic pathway. *Waste Management*, 114, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.048>
- Yap, S. D., Astals, S., Lu, Y., Peces, M., Jensen, P. D., Batstone, D. J., & Tait, S. (2018). Humic acid inhibition of hydrolysis and methanogenesis with different anaerobic inocula. *Waste Management*, 80, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.001>

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

APÉNDICE

APÉNDICE A. Revisión bibliográfica.

Tabla 9.

Revisión bibliográfica de la DA de residuos de la industria del cacao.

Residuo	Tratamiento		T [°C]	Operación	Inóculo	Rendimiento biogás [NL kgSV ⁻¹]	Rendimiento CH ₄ [NL kgSV ⁻¹]	Referencia
Mazorca	Reducción de tamaño de partícula a 300 um	Monodigestión	38	Batch 30 L	De un digestor activo que operaba con estiércol bovino y ensilaje de maíz	432	237	(Antwi et al., 2019)
		Tratamiento hidrotermal				606		
Mazorca	Adición de ácido (H ₂ SO ₄)	CoDA con estiércol de aves	37	Batch 0.25 L	De estiércol de aves	203		(Dahunsi et al., 2019)
	Adición de compuesto alcalino (H ₂ O ₂)					633		
	Reducción de tamaño de partícula menor a 2mm					321		
	CoDA con estiércol de aves					382		
Mazorca	Reducción de tamaño a 5mm	Monodigestión	35	Batch 0.5 L	Digestato de lodos activados residuales		67	(Acosta et al., 2021b)
		CoDA con estiércol bovino					181	
Mazorca	Reducción de tamaño entre 900 y 1000 um	Monodigestión	38	Batch 1.8 L	Proveniente de una planta de producción de biogás	113		(Rufis et al., 2019)
		CoDA con aguacate				73		
		CoDA con maní				75		
		CoDA con aguacate y maní				61		

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Continuación Tabla 9

Residuo	Tratamiento		T [°C]	Operación	Inóculo	Rendimiento biogás [NL kgSV ⁻¹]	Rendimiento CH ₄ [NL kgSV ⁻¹]	Referencia
Mazorca	Reducción tamaño partícula a 1.5 mm y 2 mm		35	Batch 0.5 L	Lodo efluente de un biodigestor de estiércol porcino en estado estacionario		60	(Jay et al., 2016)
Mazorca	Reducción de tamaño hasta 0.5 mm	Monodigestión	36	Batch 0.25 L	Se preparó empleando: estiércol porcino y agua. 200g estiércol:1L de agua		382	(Ivan et al., 2016)
		CoDA con residuos de frutas y estiércol porcino					497	
		CoDA con paja de arroz y estiércol porcino					340	
Mazorca	Reducción de tamaño		36	Batch 0.25 L	Lodo de un biodigestor de una planta de aguas residuales (Alpina S.A)		200	(Rodríguez et al., 2017b)
Mazorca	Reducción de tamaño de los residuos	CoDA con residuos de frutas y estiércol porcino	32	Batch 0.25 L	Lodo proveniente de un biodigestor de una planta de aguas residuales estabilizado		349	(Rodríguez et al., 2018)

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

APÉNDICE B. Ajuste de modelos cinéticos del tratamiento de dilución.

Tabla 10.

Parámetros cinéticos del tratamiento de dilución a temperatura de a) 25°C y b) 37°C.

a)

Parámetro	Unidades	M100%	M75%	M50%	M25%
Modelo primer orden (P)					
RMSE	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	5,023	3,990	4,132	4,528
R ²	-	0,963	0,979	0,983	0,975
Go	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	77,347	82,063	94,846	86,056
k	[d ⁻¹]	0,783	0,896	0,912	0,902
Modelo Gompertz Modificado (G)					
RMSE	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	0,124	0,099	0,159	0,054
R ²	-	1,000	1,000	1,000	1,000
Go	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	74,688	80,012	92,654	83,822
Rm	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	70,110	75,749	81,552	89,837
λ	[d]	0,572	0,479	0,417	0,550

b)

Parámetro	Unidades	M100%	M75%	M50%	M25%
Modelo primer orden (P)					
RMSE	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	0,00056	0,00080	0,00069	0,00076
R ²	-	1,000	1,000	1,000	1,000
Go	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	36,603	51,810	44,867	49,386
k	[d ⁻¹]	11,111	11,251	11,210	12,657
Modelo Gompertz Modificado (G)					
RMSE	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	0,0011	0,0026	0,0010	0,0056
R ²	-	1,000	1,000	1,000	1,000
Go	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	36,603	51,812	44,868	49,390
Rm	[NL CH ₄ kgSV ⁻¹]	171,481	218,624	242,291	272,929
λ	[d]	0,127	0,135	0,189	0,368

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

APÉNDICE C. Parámetros cinéticos y curvas de producción de metano para el tratamiento de Co-DA.

Tabla 11.

PBM y concentración de AGV para las monodigestiones.

ID Mezcla	T [°C]	RIS	fM	PBM [NL kgSV ⁻¹]	AGVs [mgCH ₃ COOH L ⁻¹]
Mono 28	41	3	0	170 ±3.80	600
Mono 27	41	3	1	0 ±0	3780
Mono 18	37	4	1	319 ±14.86	680
Mono 20	37	4	0	192 ±7.13	360
Mono 19	37	2	0	214 ±20.96	840
Mono 17	37	2	1	24 ±2.85	4400
Mono 31	31	4.7	1	390 ±9.95	360
Mono 32	31	4.7	0	177 ±14.42	480
Mono 6	31	3	0	236 ±0.97	660
Mono 9	31	3	1	148 ±21.15	720
Mono 30	31	1.3	0	186 ±10.88	540
Mono 29	31	1.3	1	15 ±0.54	5700
Mono 25	25	4	1	233 ±2.54	360
Mono 26	25	4	0	198 ±17.17	560
Mono 24	25	2	0	201 ±17.21	560
Mono 23	25	2	1	40 ±6.39	4640
Mono 22	21	3	0	251 ±18.02	560
Mono 21	21	3	1	124 ±10.44	1160

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Tabla 12.*Parámetros cinéticos experimentales del tratamiento de co-digestión.*

Experimento	Primer Orden				Gompertz Modificado				
	PBM ₀ [NLCH ₄ /kgSV]	k [d ⁻¹]	R ²	RMSE	PBM ₀ [NLCH ₄ /kgSV]	R _{MAX} [NLCH ₄ /kgSV d]	λ [d]	R ²	RMSE
CoDA 1	219,917	0,093	0,993	5,777	207,843	13,748	0	0,981	9,558
CoDA 2	207,268	0,103	0,994	5,364	196,575	14,774	0	0,968	12,152
CoDA 3	31,036	46,923	0,933	0,689	31,559	33,613	0,255	0,993	0,596
CoDA 4	176,602	0,189	0,987	6,128	171,776	23,226	0	0,957	11,292
CoDA 5	243,873	0,142	0,967	14,931	238,520	22,819	0	0,983	10,857
CoDA 8	227,291	0,182	0,980	10,267	222,348	28,096	0	0,981	10,069
CoDA 10	14,385	15,036	1,000	0,147	14,385	65,194	0,144	1,000	0,147
CoDA 11	317,849	0,213	0,968	17,175	309,517	46,499	0	0,931	25,227
CoDA 12	188,656	0,154	0,979	8,974	181,003	20,291	0	0,948	14,024
CoDA 13	17,188	3,141	0,996	0,255	17,181	33,885	0,156	0,996	0,263
CoDA 14	248,192	0,121	0,973	13,708	237,152	20,953	0	0,931	21,926
CoDA 15	294,301	0,192	0,971	24,244	287,156	37,805	0	0,963	24,115
CoDA 16	169,679	0,041	0,924	16,070	125,988	11,086	5,570	0,997	3,341

EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

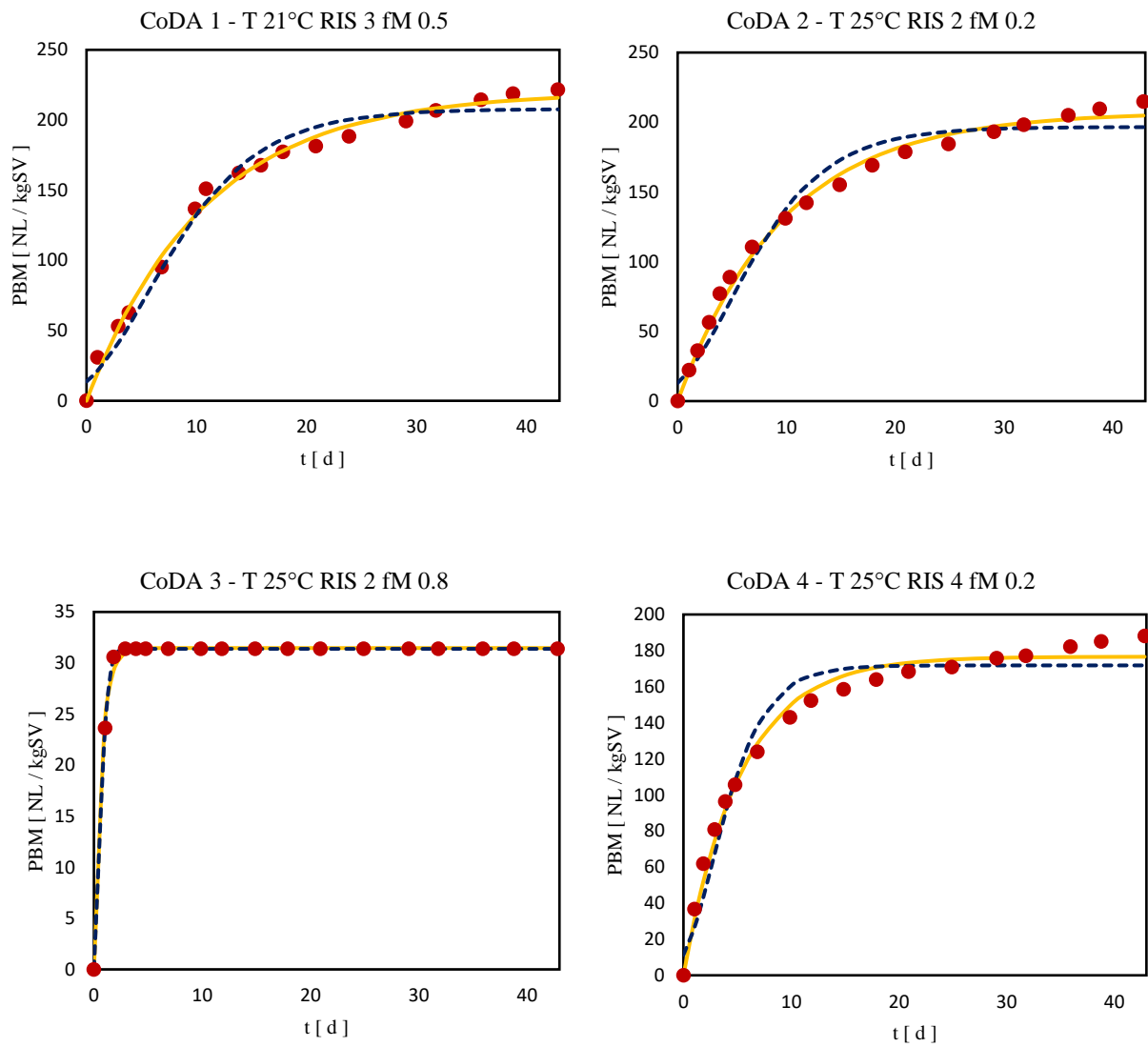
Tabla 13.*Parámetros cinéticos esperados para el tratamiento de co-digestión.*

Experimento	Primer Orden Esperado			Gompertz Modificado Esperado			
	PBM ₀ [NLCH ₄ /kgSV]	k [d ⁻¹]	R ²	PBM ₀ [NLCH ₄ /kgSV]	R _{MAX} [NLCH ₄ /kgSV d]	λ [d]	R ²
CoDA 1	146.27	0.08	0.98	138.60	7.92	0.00	0.95
CoDA 2	165.10	0.10	1.00	156.49	11.11	0.00	0.98
CoDA 3	66.12	0.29	0.94	64.64	13.18	0.00	0.89
CoDA 4	204.46	0.11	1.00	196.34	15.50	0.00	0.99
CoDA 5	235.88	0.10	0.96	228.13	15.53	0.00	0.96
CoDA 8	194.36	0.07	0.97	179.54	8.88	0.00	0.98
CoDA 10	95.29	0.12	0.99	91.09	8.16	0.00	0.97
CoDA 11	279.02	0.28	0.99	275.68	49.10	0.00	0.96
CoDA 12	173.73	0.09	1.00	161.47	11.37	0.00	0.97
CoDA 13	57.02	0.19	0.92	55.52	7.37	0.00	0.86
CoDA 14	215.52	0.11	0.99	206.54	16.99	0.00	0.99
CoDA 15	278.12	0.15	0.97	271.72	27.79	0.00	0.97
CoDA 16	83.14	0.11	0.99	79.67	6.38	0.00	0.97

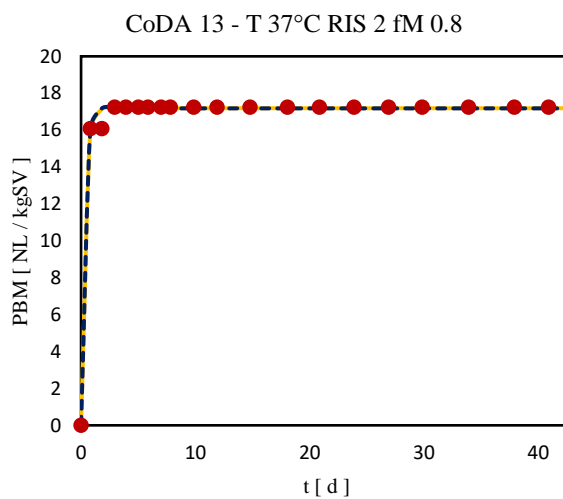
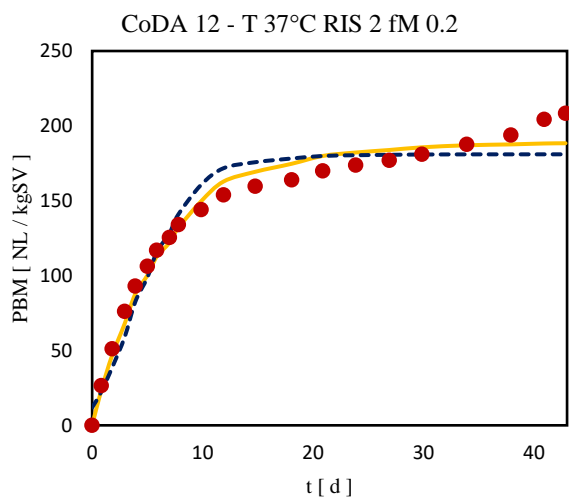
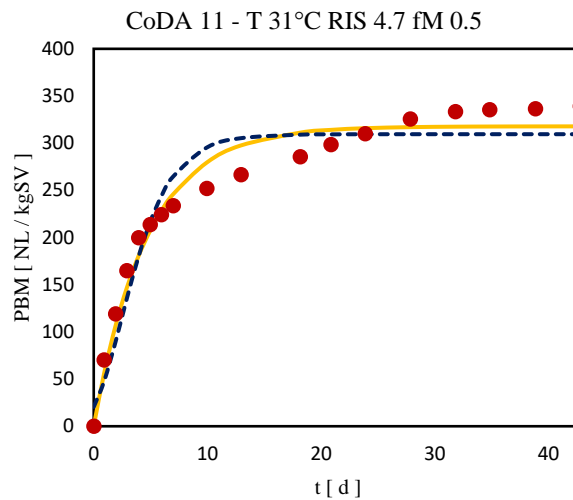
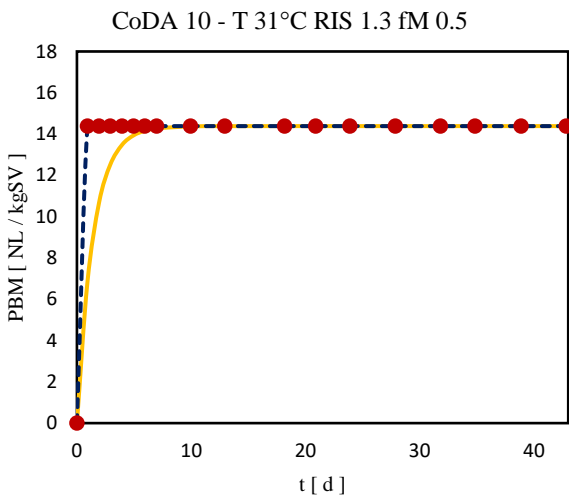
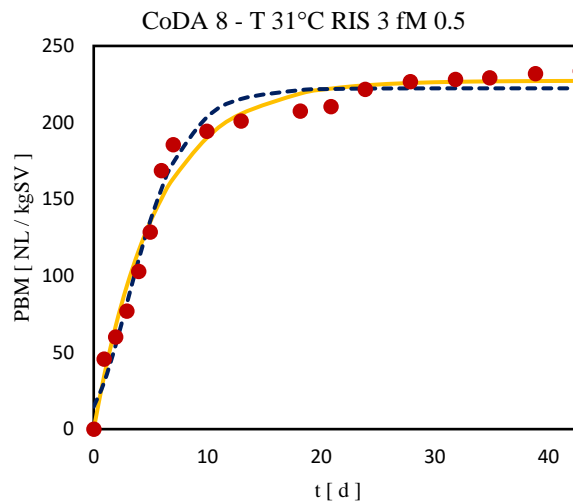
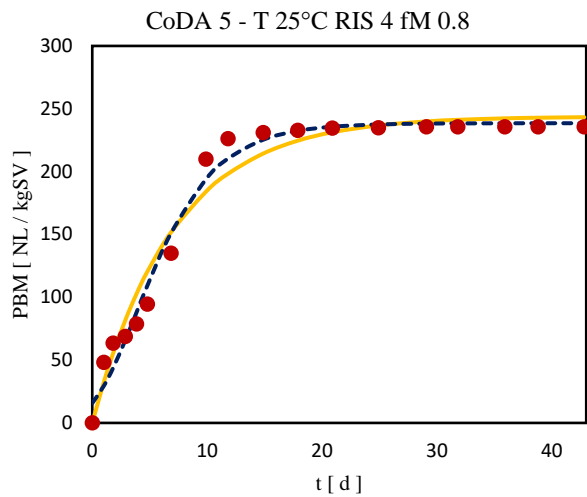
EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS

Figura 11.

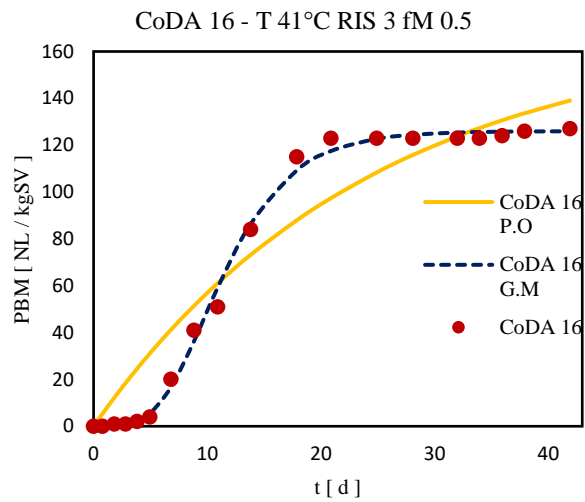
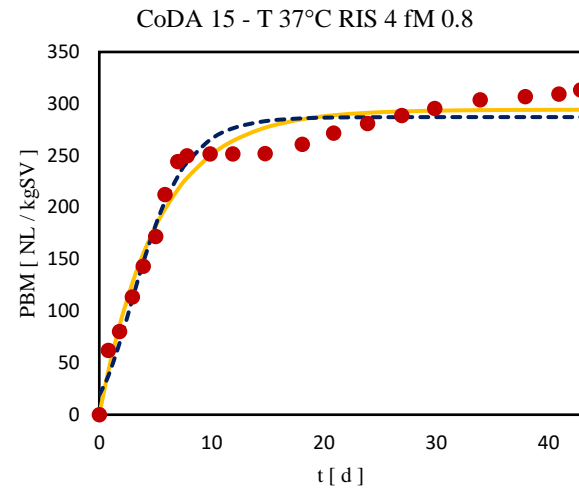
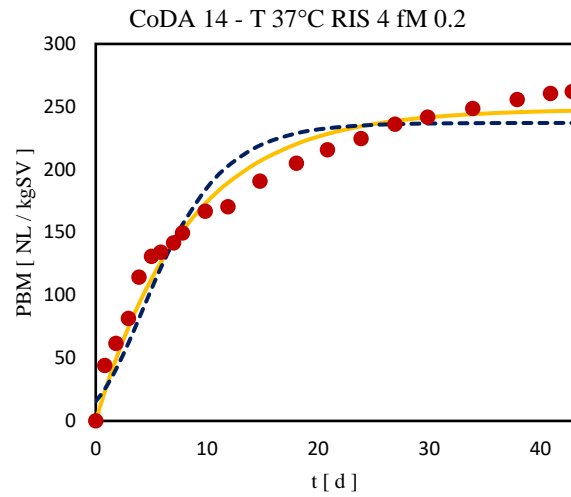
Curvas de ajuste de los modelos cinéticos en co-digestión.



EFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS



EFFECTO DE LA DILUCIÓN Y LA CO-DIGESTIÓN COMO TRATAMIENTOS



• Experimental — Primer Orden - - - Gompertz Modificado