

# Codigestión Anaeróbica de Lodos y Residuos Orgánicos Municipales en Clima Tropical

## Anaerobic Codigestion of Municipal Sludge and Organic Waste in Tropical Climate

Marian Ramírez <sup>1,2\*</sup>, Euclides Deago <sup>1,2,3,4</sup>, Lizenith Luque <sup>1,2</sup>, Nayelis Pitty<sup>1,2</sup>, Judith Arias<sup>1,2</sup>, Angelica Chen <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

<sup>2</sup>Grupo de Investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad

<sup>3</sup>Centro de Estudios Hidráulicos e Hidrotécnicos CIHH, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

<sup>4</sup>Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP)

\*Autor de correspondencia: [marian.ramirez@utp.ac.pa](mailto:marian.ramirez@utp.ac.pa)

**RESUMEN.** La digestión anaeróbica permite la conversión de los lodos orgánicos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales en fuentes de energía mediante la producción de biogás. Una manera de potenciar la producción obtenida mediante digestión anaeróbica es con la adición de otros sustratos al inóculo, mediante la codigestión anaeróbica. El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial energético de la codigestión de lodos y residuos orgánicos mediante la producción de metano, tomando en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los materiales. Los ensayos de potencial de bioquímico de metano se llevaron a cabo mediante batch, mediante método manométrico utilizando el sistema Oxitop a una temperatura de 28°C por un tiempo de retención hidráulico de 10 días. Los ensayos de codigestión de Lodos orgánicos LD-LE resultaron con una producción de metano de 121.71 mLCH<sub>4</sub>/g SV para la relación 1:1 y 154.84 mLCH<sub>4</sub>/g SV para la relación 2:1. Para la codigestión de LD-ROM se obtuvo una producción máxima de 294.92 mL CH<sub>4</sub>/g SV para la relación 1:1, mientras que para la relación 2:1 fue de 296.58 mL CH<sub>4</sub>/g SV. Los resultados obtenidos demuestran existen una disminución en el tiempo de retención hidráulico y el uso de lodo digerido como inóculo es positivo en la codigestión al reducir los tiempos de aclimatación.

**Palabras clave.** Biogás, codigestión, lodo digerido, metano, residuo orgánico.

**ABSTRACT.** Anaerobic digestion allows the conversion of organic sludge from wastewater treatment plants into energy sources through the production of biogas. One way to enhance the production obtained through anaerobic digestion is with the addition of other substrates to the inoculum, through anaerobic co-digestion. The objective of this research was to evaluate the energy potential of the co-digestion of sludge and organic waste through the production of methane, considering the physicochemical properties of the materials. The methane biochemical potential tests were carried out by batch, by manometric method using the Oxitop system at a temperature of 28°C for a hydraulic retention time of 10 days. The co-digestion trials of LD-LE organic sludge resulted in a methane production of 121.71 mLCH<sub>4</sub>/g SV for the 1:1 ratio and 154.84 mLCH<sub>4</sub>/g SV for the 2:1 ratio. For the co-digestion of LD-ROM, a maximum production of 294.92 mL CH<sub>4</sub>/g SV was obtained for the 1:1 ratio, while for the 2:1 ratio it was 296.58 mL CH<sub>4</sub>/g SV. The results obtained demonstrate a decrease in the hydraulic retention time and the use of digested sludge as inoculum is positive in co-digestion by reducing acclimatization times.

**Keywords.** Biogas, co-digestion, digested sludge, methane, organic waste.

## 1. Introducción

La digestión anaeróbica es la descomposición de los desechos orgánicos por los microorganismos en un

ambiente sin oxígeno, resultado de esto es una mezcla de gases, entre ellos, el metano y dióxido de carbono conocido como biogás [1]. Este ha llegado a ser un tratamiento de gran importancia, debiéndose a que es una

**Citación:** M. Ramírez et al., "Codigestión Anaeróbica de Lodos y Residuos Orgánicos Municipales en Clima Tropical", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (82-93), 2024.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 18 de noviembre de 2023. **Recibido con correcciones:** 04 de enero de 2024. **Aceptado:** 15 de enero de 2024.

**DOI:** <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3902>

**Copyright:** 2024 M. Ramírez et al., This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

fuerza de energía renovable. Dicha tecnología lleva siglos y se ha aplicado principalmente para la estabilización de lodos de depuradora [2]. En el año 1859, se construyó la primera planta de digestión anaeróbica en Bombay, India, y en Inglaterra se empezó con la digestión anaeróbica en el año 1895 utilizando las aguas residuales para alimentar las luces de la calle Exeter. Hoy en día, existen varios sistemas de digestión anaeróbica en países desarrollados, en especial, China, India y Nepal, mientras que Alemania, Austria y los escandinavos cuentan con plantas a gran escala industrial. En Alemania, la tecnología del biogás es avanzada y está siendo utilizada para producir electricidad verde en el rango Mega Watt[3].

Hace unos años nació el interés de utilizar la digestión anaeróbica con desechos orgánicos. Los residuos orgánicos se utilizan en la mayoría de los casos como sustrato en la codigestión y existen muchas investigaciones debido a las ventajas de esta mezcla, mencionando algunas de ellas: mejora el equilibrio de nutrientes, potencia rendimiento de biogás, mayor valor de fertilizante residual, en comparación con los métodos tradicionales de tratamiento de residuos orgánicos (incineración, vertedero, compostaje, etc.)[4]. Recientes investigaciones mencionan que tratamientos rápidos para el manejo de los residuos orgánicos son la incineración o tratamientos hidrotermales, pero dichas tecnologías térmicas son energía intensiva y no devuelven carbono orgánico al suelo. Por otro lado, las tecnologías de conversión biológica como el compostaje y la digestión anaeróbica son las más factibles y utilizadas[5]. Sin embargo, la digestión anaeróbica es más ventajosa por la producción de bioenergía en comparación con el compostaje, ya que este no proporciona grandes incentivos económicos[6].

Desde el 2019, se realizan estudios en materia de digestión anaeróbica con los lodos residuales de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Juan Diaz, donde los resultados obtenidos en monodigestiones de lodo orgánicos, mostró su viabilidad del lodo digerido para ser utilizado como inóculo en codigestiones [7].

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el proceso de codigestión del lodo digerido con residuos de frutas y vegetales (Ensayo LD-ROM) como también codigestión de lodos digeridos con lodos espesados (Ensayo LD-LE), a una temperatura de 28 °C, siendo esta una de las más bajas registradas en la Ciudad de Panamá. Esta temperatura es relevante ya que en la mayoría de los países la digestión anaeróbica es llevada a cabo en temperaturas de 35 °C en adelante, esto implica el

calentamiento de los digestores y por lo tanto un gasto energético. Con esta investigación buscamos no incurrir en los gastos de calentamiento y potenciar la producción de biogás a través de la codigestión anaeróbica de residuos orgánicos mediante la mezcla de lodos de distintas etapas del proceso dentro de la PTAR. Se realizaron ensayos batch para comprobar el Potencial Bioquímico de Metano (PBM) bajo dos diferentes relaciones Inoculo/Sustrato (I/S). Para conocer la velocidad de crecimiento de las bacterias se utilizó el Modelo Sigmoidal Gompertz Modificado y ecuación de Primer Orden para predecir la tasa de degradación.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Ubicación experimental

Los ensayos se desarrollaron en el laboratorio de sistemas ambientales del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá en la sede de Tocumen, donde se realizó la preparación de las muestras de residuos orgánicos, ensayos de digestividad y parámetros fisicoquímicos.

### 2.2. Inóculo y Sustrato

La mezcla de LD-ROM corresponde a la mezcla de Lodo Digerido (LD) como Inóculo con residuos de frutas y vegetales (ROM) como sustrato, el ROM se obtuvo de descartes de un mercado de la República de Panamá. Los residuos utilizados fueron: papa, zanahoria, brócoli, lechuga, melón y tomate, estos se picaron, trituraron, pesaron y almacenaron en bolsas de polipropileno, y fueron conservados a 4°C. Muchos sustratos deben pasar antes por un pretratamiento como la trituración, en donde se recomienda que el tamaño de las partículas sea menor o igual a 1cm, esto con el objetivo que sea más fácil su degradación [8]. Es por tal razón que se llevó a cabo la trituración (Figura 1a) y luego la homogenización de los diferentes residuos (Figura 1b).



**Figura 1.** Residuos orgánicos muestreados del mercado: a) Trituración de los sustratos; b) Sustratos homogenizados

**Fuente:** Elaboración propia.

La segunda codigestión LD-LE, se usó como inóculo lodo digerido (LD) y el lodo espesado (LE) como sustrato. Los lodos espesado y digerido fueron obtenidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Juan Díaz ubicado en la Ciudad de Panamá. Esta PTAR realiza un tratamiento de tipo biológico con recirculación de lodos, remoción de nutrientes y recuperación de gases, y depura 5.5 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales al día entre los dos módulos de la planta [9].

### 2.3. Estudios analíticos

En el proceso de inicio y operación de los reactores anaeróbicos es importante el seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos. En estos ensayos se analizaron para el inóculo y sustrato los siguientes: sólidos totales y volátiles, DQO, alcalinidad, pH, alcalinidad, utilizando el Standard Methods[10]. También se les realizó estudios bromatológicos a los residuos de frutas y vegetales.

### 2.4 Procedimiento experimental del Oxitop

Para evaluar y cuantificar la producción de biogás, se utilizó el Sistema Oxitop® (Figura 2); su medición manométrica registra delta de presiones producidas por la digestión anaeróbica. Este sistema consiste en una botella de vidrio de 250 mL de capacidad que dispone de dos válvulas de control cerradas con tapones de rosca, cuenta con cabezal de medición que se comunica con el controlador OC100 mediante infrarrojo. Adicional cuenta con una plataforma de agitación magnética.

Se realizó ensayo batch para la codigestión de lodos digeridos con residuos orgánicos y lodo espesado como sustrato teniendo una relación I/S 2:1 y 1:1 con respecto a sólidos volátiles. Los ensayos se realizaron por triplicados y duplicados de controles se incubaron a 28°C, fueron agitados de forma manual dos veces al día y magnéticamente a 180 rpm. Estos ensayos se desarrollaron durante un periodo de tiempo de 12 días.

### 2.5 Cálculo del Potencial Bioquímico de Metano

Para determinar el potencial bioquímico de metano se utilizó un método ampliamente utilizado llamado método manométrico en donde se aplicaron las ecuaciones utilizadas por Parra [11] y Ramírez [12] para conocer el volumen de metano en condiciones estándar. El método descrito calcula la presión del gas ejercido en el reactor,

esta presión se da por el biogás que se produce en el sistema[13].

## 2.6 Modelos cinéticos de crecimiento de las bacterias

El uso de estos modelos ayuda a comprender el comportamiento del sistema y la interacción de la cinética en el proceso de digestión anaeróbica permitiendo realizar predicciones del rendimiento de los digestores[14].

En los reactores batch, la acumulación de metano crea una curva sigmoideal en las que se encuentran tres fases: (1) la fase de retardo, (2) fase exponencial y (3) fase asintótica. Cuando se realiza este análisis de cinética de producción de biogás o metano, es importante buscar un modelo cinético que represente la producción de biogás a lo largo del tiempo[15]. Para los reactores anaeróbicos los modelos cinéticos más utilizados están, el modelo de primer orden que estima la acumulación de biogás como un aumento exponencial y la curva de producción de metano sigmoideal conocida como la ecuación de Gompertz modificado[16].

### 2.6.1 Modelo de primer orden

Este modelo permite establecer la velocidad de degradación del sustrato en la digestión anaerobia, sobre todo en la hidrólisis que es la etapa limitante en el proceso [16, 17]. Igualmente proporciona un medio simple para describir las condiciones del funcionamiento [18]. Para una cinética de primer orden para la hidrólisis de la materia orgánica, la producción de metano acumulado puede ser explicada con la siguiente ecuación [15]:

$$B(t) = B_0(1 - e^{(-kt)}) \quad (1)$$

Donde:

B(t): producción de metano acumulado al día t de digestión (mL/g SV).

B<sub>0</sub>: producción de potencial de metano del sustrato (mL/g SV).

k: velocidad de producción de metano (constante de desintegración de primer orden) (días<sup>-1</sup>).

### 2.6.2 Modelo de Gompertz Modificado

Este modelo permite realizar una deducción sobre el comportamiento de las etapas de la digestión anaeróbica, así como también predecir la conducta de la biomasa dentro del reactor en medios ambientales determinados, es capaz de determinar la máxima producción de metano y la fase de latencia[19].

La ecuación de Gompertz se utilizó para conocer el crecimiento de las bacterias en los reactores batch. La (ecuación 2) se expresa de la siguiente manera:

$$y = A \times \exp \left[ e \left\{ \frac{\mu_m}{A} (\lambda - t) \times e^1 + 1 \right\} \right] \quad (2)$$

Donde:

y: tamaño de una población (t).

A: valor máximo alcanzado por la población (mL).

$\mu_m$ : velocidad máxima de crecimiento ( $mL \cdot d^{-1}$ ).

t: tiempo (días).

$\lambda$ : fase retardo (días).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Caracterización de Inóculo y Sustrato

Se utilizó como inóculo al lodo digerido, para las codigestiones realizadas. Como Sustrato se usó Lodo Espesado y Residuos Orgánicos Municipales (ROM), ambas mezclas fueron ensayadas por separado. En la Tabla 1 y 2, se muestran los valores fisicoquímicos de lodos digerido y espesado.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica de Lodo Digerido

Inóculo	Lodo Digerido
pH	6.78
N (%)	0.47
C (%)	1.70
AGV ( $Kg/m^3$ )	18.5
AT ( $Kg/m^3 CaCO_3$ )	53.00
$NH_3$ ( $Kg/m^3$ )	1121
SV (%)	73.0
ST (%)	0.54

Fuente: Propia

El pH del inóculo fue de 6.78, el cual mostró estar fuera del rango de los valores indicados para lodos

provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como lo recomienda Raposo[24], Parra [23] y Díaz & García[26] donde debe estar de una rango de 7-8.5. Dependiendo de la diversidad de bacterias que se tengan el rango óptimo de pH puede variar, por lo que para bacterias acidogenicas el rango de pH optimo puede estar por debajo de 7 (Neutro).

Por otra parte, podemos observar en la tabla 2 la caracterización del lodo espesado como sustrato.

**Tabla 2.** Caracterización fisicoquímica de Lodo Espesado

Sustrato	Lodo Espesado
pH	7.13
N (%)	0.38
C (%)	2.00
AGV ( $Kg/m^3$ )	11.60
AT ( $Kg/m^3 CaCO_3$ )	68.0
$NH_3$ ( $Kg/m^3$ )	903
SV (%)	76.5
ST (%)	0.67

Fuente: Propia

Los valores de C/N, donde para el LD es 3.61 y 5.26 para LE, resultan ser valores muy bajos, lo cual es común en los lodos; Sin embargo, suelen estar entre 6 y 9 [30]. Esto muestra una escasez de carbono, lo cual puede mejorar añadiendo residuos orgánicos. El porcentaje de Carbono en los LE (2.00 %) fueron ligeramente más altos que los del LD (1.70 %), debido a la presencia de mayor biomasa bacteriana.

En la Tabla 3 se presentan las características bromatológicas del ROM. Los cuales fueron analizados por el Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP).

**Tabla 3.** Análisis bromatológicos de residuos orgánicos municipales.

Parámetros	Descripción de las muestras	
	Trituración de Frutas	Trituración de Vegetales
Materia Seca (%)	7.4	6.1
Nitrógeno (%)	0.67	2.10

Parámetros	Descripción de las muestras	
	Trituración de Frutas	Trituración de Vegetales
Proteína Cruda (%)	3.39	12.6
Extracto Etéreo (%)	13.9	10.2
Cenizas (%)	5.90	5.80
Lignina (%)	4.20	7.00
Hemicelulosa (%)	7.35	2.90
Celulosa (%)	8.74	18.2
Digestibilidad de la Materia Seca (%)	78.8	69.3
Energía Metabolizable (Mcal/kg)	2.8454	2.5006

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados expuestos en Tabla 2, el Nitrógeno es mayor en los vegetales con 2.10% que en las frutas con 0.67%, estos valores son comparables a los que arrojan Parra [23] con 1.70% y Díaz & García [26] con 1.76%.

El contenido de proteína 3.39% y 12.6% de frutas y vegetales respectivamente, presenta valores inferiores a los reportados comúnmente en otras bibliografías que va desde 13.1 a 27.17%[24], para el resultado dado para proteínas de la trituración de vegetales fue más cercano al reportado, mientras que el de frutas ha demostrado tener un valor más bajo. Cabe notar que el contenido de proteínas está comúnmente relacionado con el nitrógeno, ya que casi todo el nitrógeno que se encuentra en el sustrato está presente en forma de proteína, las cuales muestran un alto potencial de metano[24].

La materia orgánica está constituida por celulosa, hemicelulosa y lignina en donde estas proceden de los restos de vegetales[38], por tal razón los resultados que arrojan la lignina y la celulosa en cuanto a la muestra de vegetales (7% y 18.2% respectivamente) son mayores a comparación con la muestra de frutas. Estos resultados obtenidos son mayores a los reportados por Díaz & García [26] con 2.20% de lignina y 1,67% de celulosa y Parra [23] con 1,20% de lignina y 1,47% de celulosa.

Las características fisicoquímicas del ROM se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Características fisicoquímicas de Residuos Orgánicos Municipales

Muestra	pH	SV (%)	ST (%)
ROM	5.25	91.01	0.409

Fuente: Propia

El pH obtenido para los residuos orgánicos municipales fue de 5.25, lo que indica un estado ácido que promueve las bacterias acidogénicas y que puede ser inhibitorio en las etapas tempranas de la codigestión. Según lo reportado por Nakasima-Lopez et al [28], valores de pH entre 3.51 y 4.20 son los habituales en este tipo de sustratos de mezcla de frutas y vegetales.

Sin embargo, en el estudio realizado por Kesharwani [29] y Guerrero[30], los sólidos volátiles tienen un porcentaje cercano a los que arroja este estudio, esto indica que los residuos orgánicos tienen gran contenido de materia orgánica, lo que lleva a tener una buena digestibilidad, a su vez, por estar compuesto por proteínas, almidones, azúcares y grasas colaboran con este proceso[31].

### 3.2 Caracterización Fisicoquímica de Codigestiones:

En la Tabla 5, se presenta el análisis de los parámetros fisicoquímicos realizados a la mezcla de lodos digeridos y lodos espesados en proporciones 1:1 y 2:1.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las relaciones I/S de LD-LE.

Parámetro	Lodos Digeridos/ Lodos Espesados	
	I/S 1:1	I/S 2:1
pH	6.52	6.67
Alcalinidad (%)	3.44	3.97
Oxígeno (%)	17.50	16.30
Hidrogeno (%)	6.06	6.25
Azufre (%)	0.93	0.96
Carbono (%)	35.57	38.28
Carbono orgánico total (%)	3.44	3.97
Nitrógeno total (%)	6.06	6.25
Nitrógeno Amoniacal (%)	1.38	1.38
Acido grasos volátiles (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	1,200	1,447
Demanda Química Oxígeno (mg/L)	24,666	33,833

Fuente: Propia

El pH en los reactores del ensayo se ajustó al rango óptimo, aproximadamente, agregándole carbonato de sodio para estabilizar el proceso y no llegar a acidificarse

como lo utilizaron Abdulkarim [36] y Raposo [24] en su investigación.

El resultado de la relación (C/N) de la Codigestión LD/LE en la proporción 1:1 es de 5.86 y 2:1 es de 6.12. Se observa que el resultado está de acuerdo con lo expresado en la literatura, donde se menciona que la relación (C/N) de los lodos, tienen un rango de 6 a 9 [20,31]. Sin embargo, al tener menor presencia de carbono, los rendimientos en este tipo de codigestión pueden verse limitados al agotarse en etapas tempranas de la metagenización.

En la Tabla 6, se presenta el análisis de los parámetros fisicoquímicos realizados a la mezcla de lodos digeridos y residuos orgánicos municipales (ROM) en proporciones 1:1 y 2:1.

**Tabla 6.** Parámetros fisicoquímicos de las relaciones I/S de LD-ROM.

Lodos Digeridos/ Residuos Orgánicos Municipales		
Parámetro	I/S 1:1	I/S 2:1
pH	7.37	7.77
Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	5,020	4,975
Oxígeno (%)	27.20	16.10
Hidrogeno (%)	3.80	4.30
Azufre (%)	0.43	0.50
Carbono (%)	27.49	21.68
Carbono orgánico total (%)	47.39	37.38
Nitrógeno total (%)	4.06	3.95
Nitrógeno Amoniacal (%)	1.33	1.53
Acido grasos volátiles totales (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	362	205
Relación C/N	6.77	5.48
DQO (mg/L)	35,750	48,341

DQO: Demanda Química de Oxígeno

Fuente: Propia

El rango óptimo para la alcalinidad recomendada es de 1000 a 5000 mg/L CaCO<sub>3</sub>[35]. En este sentido, los reactores de relaciones 1:1 dieron valores promedio de 5,020 cercano al rango superior mencionado. Por otra parte, la relación 2:1 presento alcalinidad de 4,975 esta se encuentra dentro del rango de valores conocidos como óptimos.

Los datos de nitrógeno y carbono tienen consistencia con los ensayos que realizó Guerrero [39] y los resultados de Nielfa [40], ya que nuestros resultados se acercan a los de ellos, quienes realizaron codigestión de residuos orgánicos municipales y lodos biológicos.

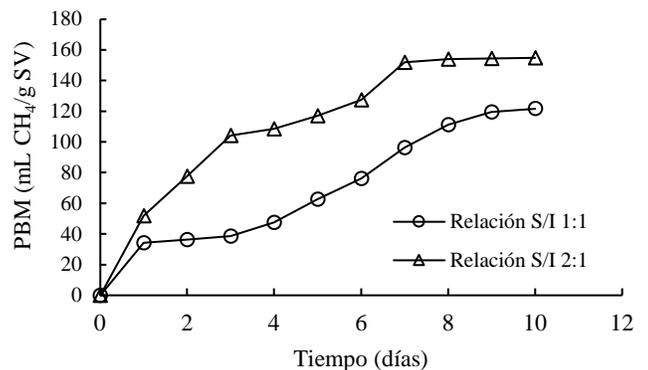
Los residuos orgánicos tienden a tener una mayor relación de C/N a comparación con los lodos de PTAR. Esto se debe a que los residuos orgánicos tienen mayor materia orgánica, lo cual es ventajoso al momento de realizar la codigestión de lodos y residuos orgánicos.

Los valores de la relación C/N están entre el rango de 6 a 15.4 según lo reporta Sosnowski[41], Guerrero [39] y Schnürer[42]. La relación I/S 1:1 está por dentro del rango con 6.77, mientras que la relación 2:1 está por debajo del rango óptimo con 5.48. Los datos que arrojó este ensayo tuvieron un aproximado con el estudio de Guerrero [39] que reportó una relación C/N de 9.35 y los análisis de Morales [43] reportan una relación C/N de 8.35.

El buen rendimiento en este ensayo se debe también a los AGV que se encontraron por debajo de la concentración de 1500 mg/L en el que genera efectos inhibitorios [43,44], esto indica que en ninguna de las relaciones I/S hubo acumulación de AGV y el pH se mantuvo dentro del rango, ambos factores son característicos de rápida acidificación[36].

### 3.3 Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Los valores experimentales de la producción de metano para el día 10 en la relación 1:1 y 2:1 alcanzaron una producción de metano de 121.71 mLCH<sub>4</sub>/g SV y 154.84 mLCH<sub>4</sub>/g SV (ver figura 3). Estos valores resultaron estar cercanos a los indicados en literatura, donde con una temperatura mayor y en un tiempo de retención hidráulica mayor a las de estos ensayos obtuvieron valores entre 140 - 210 mL CH<sub>4</sub>/g SV [45, 46].



**Figura 3.** PBM COD LD-LE.

Fuente: Propia

En la Figura 3, se puede observar una tendencia a la estabilización a partir del día 7 y para la relación 2:1 a

partir del día 9, podemos inferir que la relación 2:1 al tener más biomasa como inoculo, tiene un mejor aprovechamiento del material orgánico disponible mediante el sustrato. Se debe mencionar al usar Lodo espesado como sustrato, el carbono biodisponible es limitado [30]. Se puede observar en la Tabla 7, el PBM teórico para las dos relaciones resulto ser mayor que el registrado experimentalmente. Se puede notar que para la relación 2:1, el margen de diferencia entre experimental y teórico fue mayor, esto se puede deber a que el cálculo teórico toma en cuenta todo lo generado como metano, sin embargo, se conoce que en el desarrollo experimental hay otros gases subproductos que tienen parte en la digestión anaeróbica [22].

Tabla 7. PBM Experimental y Teórico de COD LD-LE

Relación I/S	PBM Experimental (mL CH <sub>4</sub> /g SV)	PBM Teórico (mL CH <sub>4</sub> /g SV)
1:1	121.71	159.99
2:1	154.84	227.79

Fuente: Propia

Observando la Figura 4, para la codigestión LD-ROM se obtuvieron valores de 294.92 mL CH<sub>4</sub>/g SV y 296.58 mLCH<sub>4</sub>/g SV para las relaciones 1:1 y 2:1 respectivamente. Esta se desarrolló a una temperatura de 28°C durante tiempo de retención hidráulico de 10 días aproximadamente. Los resultados más favorables fueron los de la relación 2:1. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de rendimiento de CH<sub>4</sub> de residuos de frutas y hortalizas que va desde 220 – 551 mL CH<sub>4</sub>/g SV [41].

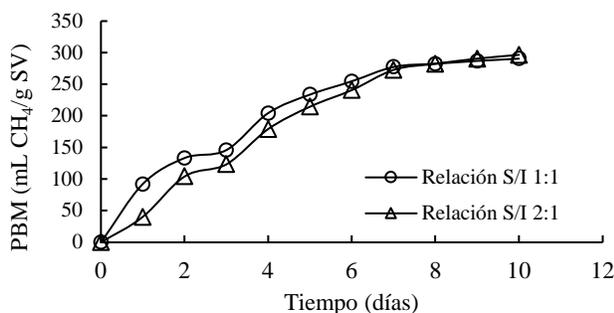


Figura 4. PBM COD LD-ROM  
 Fuente: Propia

Los resultados positivos que arrojó este ensayo pueden deberse a los residuos orgánicos son sustratos con presencia de materia orgánica que se degradan más fácil[47], también el inóculo usado paso por un proceso de aclimatación lo cual ayudó a que se adaptara al medio, beneficiando a que la fase de retardo fuera cero [48].

Estos resultados nos permiten corroborar que la mezcla de residuos orgánicos con lodos de la PTAR causa un incremento en la producción de metano. Diferentes literaturas mencionan que en las temperaturas mesófilas hay más variedad de microbios que pudieron beneficiar la degradación de las fuentes de carbono, siendo favorables para el proceso [25, 49]. En la misma figura se puede observar que a medida que se incrementa la carga orgánica en los lodos el PBM tiene un leve aumento como lo es en la relación I/S 2:1. Al igual que el proceso comienza a estabilizarse después del día 8, cercanos a los reportados por Nielfa [51] las cuales sus ensayos de codigestión comenzaron a estabilizarse a partir del día 15, otra investigación es la de Parra [18] donde demuestra que la fase de estabilización también comienza cerca del día 15 a 16 para las siete relaciones sustrato/inóculo que realizaron.

En ocasiones los rangos de los resultados van a variar ya que cada investigación utiliza sustratos e inóculos de diferentes fuentes, otras relaciones inóculo/sustrato y varían los volúmenes de reactores entre otros factores. El PBM Teórico LD-ROM para la relación 1:1 fue más bajo que la experimental con 216.17 mL CH<sub>4</sub>/g SV, mientras que en la relación 2:1 fue mayor con 315.47 mL CH<sub>4</sub>/g SV (Tabla 8). Según Achinas [52] es poco probable que los resultados coincidan con los datos a escala experimental, ya que en la práctica ninguna reacción se completa del todo y no se tiene el 100% de descomposición de los materiales celulósicos. La ecuación predice escenarios ideales que no se llevan a cabo a escala real.

Al igual Baquerizo[53] indica que los residuos orgánicos y desperdicios de cultivos, al contener “fracciones puras” con diversos sustratos de naturaleza mezclada hacen que los datos teóricos y experimentales sean diferentes debido a la sinergia de estos.

Tabla 8. PBM Experimental y Teórico de COD LD-ROM

Relación I/S	PBM Experimental (mL CH <sub>4</sub> /g SV)	PBM Teórico (mL CH <sub>4</sub> /g SV)
1:1	294.92	216.17

Relación I/S	PBM Experimental (mL CH <sub>4</sub> /g SV)	PBM Teórico (mL CH <sub>4</sub> /g SV)
2:1	296.58	315.47

Fuente: Propia

### 3.4 Análisis Cinético de Codigestión LD-LE:

Como se observa en la Figura 5., este modelo tiene un comportamiento diferente entre las relaciones, ya que el  $R_{max}$  de la relación 2:1 es de 33.87 (mL CH<sub>4</sub>/g SV) /día, se puede observar que la mayor velocidad de la producción de metano es de la relación 1:1 con 12.94 (mL CH<sub>4</sub>/g SV) /día, esto es congruente con las gráficas de PBM presentadas donde la relación 1:1 donde su crecimiento fue más ralentizado y con menor pendiente que la relación 2:1.

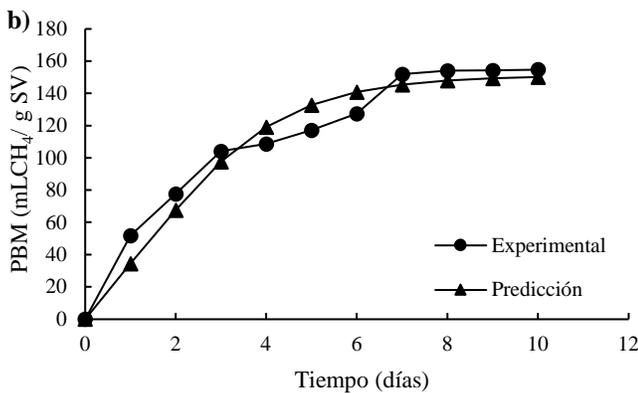
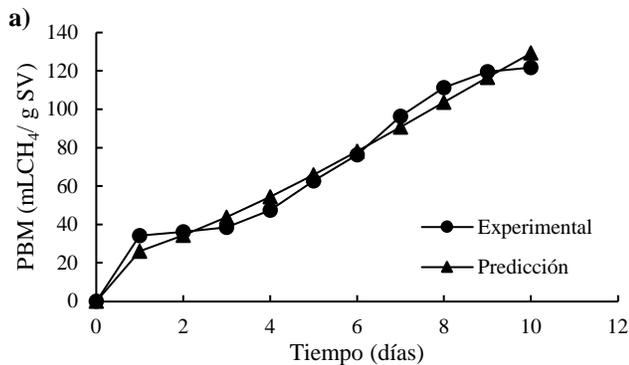


Figura 5. Análisis cinético Gompertz Modificado a) I/S 1:1 b) I/S 2:1 Fuente: Propia.

En cuanto la duración de la fase de letargo ( $\lambda$ ) representa el tiempo que tardan los metanógenos en

adaptarse a un sustrato antes de producir metano, la relación 1:1 y 2:1 es de 0 días, este valor significa un menor tiempo de aclimatación para la producción de metano, en este caso indica que la codigestión con inóculo aclimatado por su actividad previa de digestión es positivo para la actividad metanogénica.

Por otra parte, el parámetro de  $G_0$ , nos indica la producción máxima de metano alcanzado, el que presenta mayor ajuste al modelo matemático Gompertz es la relación 2:1, con una  $G_0$  de 151.05 mL CH<sub>4</sub>/g SV y donde el resultado experimental es de 154.84 mL CH<sub>4</sub>/g SV. Estos resultados se observan cercanos el uno del otro, lo cual indica que la codigestión estuvo muy cerca de su valor de estabilización y asimismo indica que los resultados de los ensayos de laboratorio se adaptan mejor al modelo Gompertz modificado. Por otro lado, se puede mencionar de la relación 1:1 la  $G_0$  es de 288.61 mL CH<sub>4</sub>/g SV y el resultado experimental es de 121.71 mL CH<sub>4</sub>/g SV, la cual, no hubo similitud entre el valor experimental y el ajuste de Gompertz Modificado.

Mediante la ecuación de Primer Orden utilizada para el cálculo de la constante de hidrólisis  $K_h$ , se obtuvieron los valores para la relación 1:1 y 2:1 de 0.19 y 0.35 días<sup>-1</sup> respectivamente. Los valores registrados para la relación 2:1 son parecido a los reportados por Keucken [59] donde para una codigestión de lodos mixtos obtuvo 0.34 días<sup>-1</sup>.

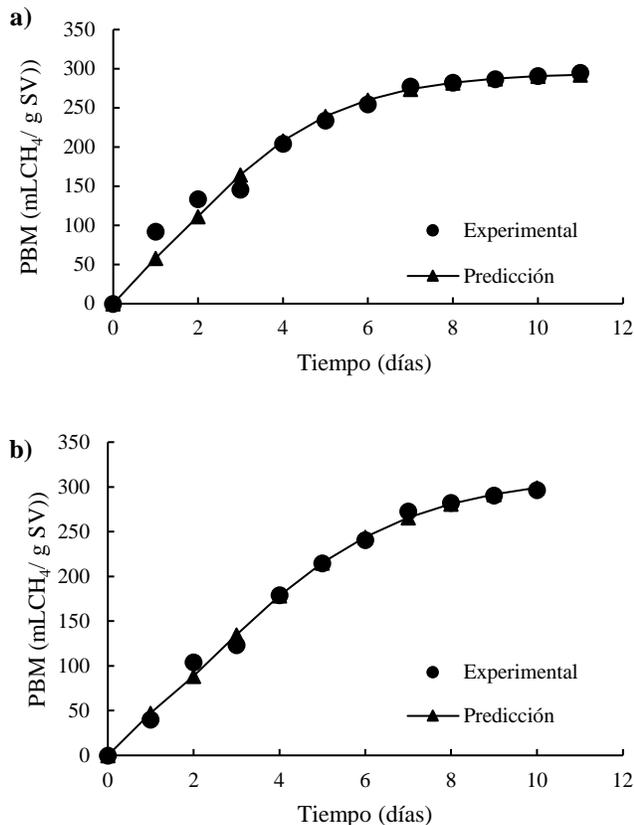
### 3.5. Análisis cinéticos de Codigestión LD-ROM:

En este ensayo se emplearon modelos cinéticos donde se analizaron tres aspectos: velocidad de crecimientos de los microorganismos, tasa de crecimiento y comportamientos de los microorganismos con relación al sustrato, estos modelos fueron Gompertz Modificado y Primer orden.

Las relaciones I/S arrojan un comportamiento similar en cuanto al análisis del Gompertz Modificado, siendo la  $R_{max}$  de la relación 1:1 de 55.57 mL CH<sub>4</sub>/g SV/día con el resultado más favorable en la velocidad de producción de metano mientras que la relación 2:1 fue de 46.53 mL CH<sub>4</sub>/g SV/día, los datos mencionados de  $R_{max}$  son altos comparados con el ensayo de Díaz [48] y Córdoba [17] que su  $R_{max}$  para la fracción orgánica de residuos fue de 31.99 mL CH<sub>4</sub>/g SV para la relación 1:1, mientras que el estudio de González y otros [54] cuya  $R_{max}$  para relación 1:1 fue de 48.38, 52.67 y 46.71 mL CH<sub>4</sub>/g SV teniendo consistencia con los datos de este ensayo y para la

relación 2:1 fue 104.26, 123.68 y 128.45 mL CH<sub>4</sub>/g SV siendo más altas que las registradas para la relación 2:1.

En la Figura 6, se presentarán los ajustes experimentales y la predicción de los análisis cinéticos de la relación I/S 1:1 y 2:1 para codigestion de lodos digeridos y residuos orgánicos municipales.



**Figura 6.** Ajuste de análisis cinéticos de la: a) I/S 1:1; b) I/S 2:1  
 Fuente: Propia.

Con esta codigestión de LD-ROM se corrobora lo obtenido en la codigestión de lodos orgánicos LD-LE, donde el inóculo aclimatado tuvo un efecto positivo en los tiempos de letargo, mostrando una aclimatación inmediata. Las  $\lambda$  resultantes fueron para la relación 1:1 de 0 días y relación 2:1 de 0.10 días. Esto a su vez es congruente con lo registrado en codigestión de lodos orgánicos con lodos aclimatados a 25°C y que mostraron tiempos de letargo de 0.13 días [60].

En cuanto a la ecuación de Primer Orden en la Kh (constante de hidrólisis) fue de 0.31 días<sup>-1</sup> para la relación I/S 1:1 y 0.25 días<sup>-1</sup> para la relación I/S 2:1 que concuerdan con la codigestión de Nielfa y otros[42]. La data obtenida en este estudio fue más alta en comparación

con los valores de 0.016 – 0.125 días<sup>-1</sup> reportados por Gunaseelan [55] quien utilizó frutas y vegetales como sustrato.

Si bien hubo un ligero incremento en la tasa de hidrólisis en los tratamientos conforme se aumentó el volumen de residuos orgánicos en la relación I/S 1:1 como también al nivel de lodo que tiene la codigestión del ensayo ya descrito. Las constantes de hidrólisis de las relaciones I/S se encuentran dentro del rango de sustratos ricos en proteínas (0.25 – 0.8) y lípidos (0.1 – 0.7) combinado con lodos[55]. A través de esta ecuación todo parece indicar que existió una buena degradación de los sustratos.

Según el ensayo de Vavilin y otros[57], lo reportado por Kayhanian [58] y Aldin [56] la reducción del tamaño de las partículas acelera el proceso de la digestión anaeróbica, indica que la tasa de producción de metano es proporcional al tamaño de la partícula de la materia prima, es decir, el crecimiento tan rápido en pocos días, puede deberse a que en la codigestión se utilizaron sustratos que fueron cortados en partículas pequeñas y licuados, lo que resultó ser positivo para los microorganismos, obteniendo un crecimiento exponencial rápido, una mejor digestibilidad y así mejor producción de metano.

#### 4. Conclusiones

- El ensayo potencial bioquímico de metano demuestra que la codigestión anaerobia de Lodos Espesados y Lodos Digeridos en comparación con la monodigestión de estos lodos, es una gran opción ya que aumenta la producción de metano en menor tiempo de retención hidráulico.
- La caracterización de los parámetros de los lodos orgánicos, demostraron que tienen las condiciones fisicoquímicas para el proceso de digestión y producción de metano.
- Al realizar los análisis fisicoquímicos de frutas y vegetales como sustratos, estos indican que existe un alto grado de biodegradabilidad, como también un alto contenido de materia orgánica, son una fuente importante para llevar a cabo su aprovechamiento a través de la digestión anaeróbica.
- Los valores obtenidos en los resultados de los ensayos han demostrado que la codigestión de lodos y residuos orgánicos LD-ROM, los residuos son ricos en carbohidratos y proteínas son los apropiados para utilizarlos como sustrato en el proceso, ya que

han influido de manera positiva en la codigestión. Al observarse valores más elevados de producción de metano en menor tiempo comparado con la codigestión de lodos orgánicos LD-LE.

- La relación 2:1 fue la proporción que mejores resultados mostró en ambas codigestiones, lo que nos permite conocer que existe mejor adaptación inóculo sustrato con esta relación.
- El uso de un lodo aclimatado con una digestión previo, como lo es el lodo digerido permitió un rápido crecimiento y desarrollo de la actividad metanogénica, lo que resultó en menores tiempo de retención.

### AGRADECIMIENTOS

A SENACYT, por brindarnos el apoyo económico para el desarrollo de esta investigación mediante el Proyecto IDDSE19-008 “Codigestión anaeróbica de biosólidos de aguas residuales y desechos orgánicos municipales como alternativa energética sostenible”. Al CEMCIT-AIP, por la administración de los fondos para esta investigación. Agradecemos a la Universidad Tecnológica de Panamá y al Centro de Investigaciones Hidráulica e Hidrotécnicas por brindarnos las instalaciones para el desarrollo de esta investigación, como también al Programa Saneamiento de la Bahía de Panamá por las muestras de lodos. Agradecemos al IDIAP por prestarnos sus servicios de laboratorios y facilitarnos los resultados de análisis bromatológicos de las muestras de los sustratos.

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

### CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

M.R: Experimentación en ensayos de Codigestión, preparación y corrección de artículo; E.D: Conceptualización de artículo, experimentación y corrección de artículo.; L.L: experimentación en ensayos de codigestión de residuos orgánicos municipales y preparación de artículo; N.P: experimentación en ensayos de codigestión de residuos orgánicos municipales y preparación de artículo; J.A: experimentación en ensayos de codigestión de lodos orgánicos y preparación de artículo; A.C:

experimentación en ensayos de codigestión de lodos orgánicos y preparación de artículo .

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

### REFERENCIAS

- [1] N. Park, R. Thring y S. Helle, Comparison of methane production by co-digesting fruit and vegetable waste with first stage and second stage anaerobic digester sludge from a two stage digester., 2012.
- [2] G. Esposito, L. Frunzo, A. Giordano, F. Liotta, A. Panico y F. Pirozzi, Anaerobic co-digestion of organic wastes., 2012.
- [3] E. Muzenda, Bio-methane Generation from Organic Waste: A Review, 2014.
- [4] H. Zhang, D. An, Y. Cao, Y. Tian y J. He, Modeling of Methane Production Kinetics of Anaerobic Co-Digestion of Agricultural Wastes Using Sigmoidal Functions., 2021.
- [5] I. Angelidaki, L. Ellegaard y B. Ahring, Applications of the anaerobic digestion process, 2003.
- [6] S. Mehariya, A. Kumar, P. Karthikeyan, E. Punniyakotti y J. W.C. Wong, Co-digestion of food waste and sewage sludge for methane production: Current status and perspective., 2018.
- [7] L. Cárdenas, B. Parra, P. Torres y C. Vásquez, Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos, 2016.
- [8] C. Niño, Evaluación y comparación de las buenas prácticas y nuevas tecnologías en el manejo de aguas residuales en la planta de tratamiento de La Calera - Colombia y Juan Diaz - Panamá., 2018.
- [9] *Programa Saneamiento de Panamá.* 2020.
- [10] APHA, AWWA and WEF, Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater., Baltimore, Meryland., 2005.
- [11] B. A. P. Orobio, Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal, 2014.
- [12] M. Ramírez, Caracterización fisicoquímica y de digestividad de lodos orgánicos generados en sistemas de tratamiento de aguas residuales en Ciudad de Panamá, 2022.
- [13] V. Ortiz, Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica de un fango anaerobia mediante el sistema oxitop., 2011.
- [14] J. Gontupil, Anaerobic Co-digestion of Swine Manure and Agricultural Residues for Biogas Production., 2013.

- [15] C. Vega, «Estudio de factibilidad para el aprovechamiento energético de los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales de la PTAR de Lloa a través de la producción de biogás por digestión anaerobia, Cantón Quito, Provincia de Pichincha.» 2022.
- [16] A. Bolaños y L. Sandoval, Evaluación de la influencia de métodos volumétricos y manométricos sobre la cuantificación de biogás/metano en la biodegradabilidad anaerobia de la celulosa., 2022.
- [17] V. Córdoba, Estudio de la Cinética de la Digestión Anaeróbica de Residuos Orgánicos y Agroindustriales, 2016.
- [18] B. Parra, L. Angulo, J. Loaiza, W. Torres y P. Torres, Inoculum mixture optimization as strategy for to improve the anaerobic digestion of food waste for the methane production., 2018.
- [19] B. Richards, R. Cummings, T. White y W. Jewell, Methods for kinetic analysis of methane fermentation in high solids biomass digesters, 1991.
- [20] K. Cáceres y A. Rincón, Evaluación del potencial bioquímico de metano del agua residual de la UPB seccional Bucaramanga, variando las condiciones iniciales de pH y materia orgánica., 2018.
- [21] W. Ling Chow, S. Chong, J. W. Lim, Y. J. Chan, M. F. Chong, T. J. Tiong, K. J. Chin y G.-T. Pan, «Anaerobic Co-Digestion of Wastewater Sludge: A Review of Potential Co-Substrates and Operating Factors for Improved Methane Yield.» 2020.
- [22] M. L. Cárdenas- Cleves, B. A. Parra-Orobio y P. Torres-Lozada, «Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos.» 2016.
- [23] B. Parra-Orobio, P. M.-R. L. Torres-Lozada, L. Cárdenas-Cleves, F. C. Vásques, W. Torres-López y J. Ordóñez-Andrade, «Influencia Del pH Sobre La Digestión Anaerobia De Biorresiduos De Origen Municipal.» Revista Actual & Científica , 2014.
- [24] F. Raposo, Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study., 2011.
- [25] P. Orobio, A. Mosquera, L. Gualtero, T. López y T. Lozada, Inoculum mixture optimization as strategy for to improve the anaerobic digestion of food waste for the methane production, 2018.
- [26] J. Díaz Vargas y A. Y. García García, Influencia de la temperatura sobre la generación de gas metano a partir de la digestión anaerobia de residuos de alimentos, 2021.
- [27] B. A. P. Orobio, Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal, 2014.
- [28] Nakasima-López, M., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., & Velázquez-Limón, N. (2017). Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos. Información Tecnológica, 28(1), 199-208.
- [29] N. Kesharwani y S. Bajpai, Batch anaerobic co-digestion of food waste and sludge: a multi criteria decision modelling (MCDM) approach, 2020.
- [30] I. C. J. Guerrero, EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DE LA CO-DIGESTIÓN DE LODOS PROVENIENTES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES MEZCLADOS CON RESIDUOS DE ALIMENTOS, 2016.
- [31] J. Lin, J. Zuo, L. Gan, P. Li, F. Liu, K. Wang, L. Chen y H. Gan, Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China, 2011.
- [32] C. Morales, Co-digestión anaerobia y pretratamiento de residuos agroalimentarios con fangos UASB de depuradora., 2019.
- [33] G. González, E. Rustrían, E. Houbron y A. Zamora, Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz, México., 2008.
- [34] A. Bernal, G. González y G. Cuevas, Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos, 2020.
- [35] E. Reyes, Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos, 2017.
- [36] B. Abdulkarim y M. Abdullahi, Effect of Buffer (NaHCO<sub>3</sub>) and Waste Type in High Solid Thermophilic Anaerobic Digestion, 2010.
- [37] P. Muñoz, Assessment of Batch and Semi-continuous Anaerobic Digestion of Food Waste at Psychrophilic Range at Different Food Waste to Inoculum Ratios and Organic Loading Rates, 2017.
- [38] J. Fernández, Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura., 2010.
- [39] I. C. Julio Guerrero, Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos, Medellín , 2016.
- [40] A. Nielfa, R. Cano y M. Fdz-Polanco, Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge, 2014.

- [41] P. Sosnowski, A. Wiczorek y S. Ledakowicz, Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes, 2003.
- [42] A. Schnürer y A. Jarvis, Microbiological Handbook for Biogas Plants, 2009.
- [43] C. Morales, M. Cledera, K. Hueso y M. Revuelta, Anaerobic digestion in wastewater reactors of separated organic fractions from wholesale markets waste. Compositional and batch characterization. Energy and environmental feasibility, 2020.
- [44] C. V. Alonso, C. G. Lahoz, F. G. Herruzo y J. R. Maroto, Producción de biogás a partir de residuos vegetales, 2006.
- [45] B. Parra, A. Donoso y P. Torres, Pre-dimensioning of Small-Scale Anaerobic Reactors of Food Waste Through Biochemical Methane Potential Assays and Kinetic Models, 2021.
- [46] A. Luisina, V. Córdoba, J. Hungría y S. Santalla, «Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora.» RedBioLac, pp. 20-27, 2019.
- [47] F. Sakaveli, M. Petala, V. Tsiridis y E. Darakas, «Enhanced Mesophilic Anaerobic Digestion of Primary Sewage Sludge,» Water, 2021.
- [48] J. Díaz y A. Y. García, Influencia de la temperatura sobre la generación de gas metano a partir de la digestión anaerobia de residuos de alimentos., 2021.
- [49] I. Julio, C. Peláez y F. Molina, Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos., 2016.
- [50] M. Zamri, S. Hasmady, A. Akhilar, F. Ideris, A. Shamsuddin, M. Mofijur, I. Fattah y T. Mahlia, A comprehensive review on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste., 2021.
- [51] A. Nielfa, R. Cano y M. Fdz-Polanco, Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge., 2014.
- [52] S. Achinas y G. Willem, Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste., 2016.
- [53] R. Baquerizo, J. Pagés y I. Pereda, El modelo de Buswell. Aplicación y comparación. Principales factores que influyen en su aplicación., 2016.
- [54] J. E. González, Y. Hernández, L. López y J. Jiménez, Digestión anaerobia de suero de queso utilizando inóculo de estiércol porcino a diferentes relaciones inóculo-sustrato., 2021.
- [55] V. Nallathambi Gunaseelan, Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks, 2003.
- [56] S. Aldin, The Effect of Particle Size on Hydrolysis and Modeling of Anaerobic Digestion, 2010.
- [57] V. Vavilin, B. Fernandez, J. Palatsi y X. Flotats, Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview, 2007.
- [58] M. Kayhanian y S. Hardy, The impact of 4 design parameters on the performance of a high-solids anaerobic digestion process of municipal solid waste for fuel gas production., 1994.
- [59] Keucken, A., Habagil, M., Batstone, D., Jeppson, U., & Amell, M. (2018). Anaerobic Co-Digestion of Sludge and Organic Food Waste Performance, Inhibition, and Impact on the Microbial Community. *Revista: Energies*.
- [60] Deago E, Ramírez M, Espino K, Nieto D, Barragán M, García M, Guevara-Cedeño J. Optimizing Anaerobic Digestion at Ambient Temperatures: Energy Efficiency and Cost Reduction Potential in Panama. *Water*. 2023; 15(14):2653. <https://doi.org/10.3390/w15142653>