



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y
CIENCIAS DEL AGUA**

**MODELAJE DEL RENDIMIENTO ESPECÍFICO DE
METANO DE UN DIGESTOR PSICROFÍLICO CON LA
CURVA MODIFICADA DE GOMPERTZ**

PRESENTA

BIÓL. ALMA KARINA MONCIVAIS GÓMEZ

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

Maestra en Ciencias del Agua

TUTOR ACADÉMICO

DR. MARIO ESPARZA SOTO

TUTORES ADJUNTOS

DR. SERGIO ALCARAZ IBARRA

DRA. MARÍA DE CARMEN JIMÉNEZ MOLEÓN

TOLUCA, MÉXICO

AGOSTO, 2023

ÍNDICE

Acrónimos	1
Abstract	3
Introducción	4
Antecedentes	6
Digestión anaerobia	6
Digestión anaerobia a baja temperatura	6
Biogás	7
Parámetros que inciden en el proceso de digestión anaerobia	7
pH	7
Nutrientes	7
Tiempo de retención hidráulico	8
Carga orgánica volumétrica aplicada	8
Lodos activados de purga	8
Codigestión de residuos	9
Modelos cinéticos para el rendimiento específico de metano	9
Curva de Gompertz	9
Estado del arte de la digestión anaerobia	12
Justificación contextual y científica	20
Hipótesis	22
Objetivos	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
Materiales y Métodos	23
1. Residuos orgánicos de cocina	23
2. Lodo activado de purga concentrado	23
3. Codigestión de residuos orgánicos de cocina con lodo activado de purga concentrado	23
4. Digestor anaerobio semicontinuo escala piloto	24
5. Estrategia de operación	26
6. Monitoreo del digestor anaerobio	26

7. Composición del biogás	27
8. Fórmulas para el análisis de los datos obtenidos	28
9. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M	34
10. Potencial bioquímico de metano	35
Resultados y discusión	37
1. Caracterización del sustrato, inóculo y codigestión.....	37
2. Temperatura de operación del digester anaerobio semicontinuo a escala piloto	38
3. pH	40
4. Tiempo de retención hidráulico.....	44
5. Sólidos volátiles del influente, efluente y porcentaje de remoción	45
6. Carga orgánica volumétrica aplicada y removida.....	47
7. Producción de biogás y porcentaje de metano	49
9. Rendimiento específico de biogás y metano	60
10. Rendimiento específico metano modelado con la ecuación modificada de Gompertz	68
11. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M.....	73
12. Potencial bioquímico de metano	77
Conclusiones	79
Referencias bibliográficas	81

FIGURAS

Figura 1. Curva del comportamiento de metano y constantes cinéticas de la ecuación modificada de Gompertz. Lay et al. (1996).	10
Figura 2. Relación entre el rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación psicrófila.	12
Figura 3. Relación entre el rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación mesófila y termófila.	13
Figura 4. Relación entre el rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación psicrófila.....	14

Figura 5. Relación entre el rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación mesofílica y termofílica.....	15
Figura 6. Relación entre la carga orgánica volumétrica aplicada y el tiempo de retención hidráulico, a condiciones de operación psicofílica.....	16
Figura 7. Relación entre la carga orgánica volumétrica aplicada y el tiempo de retención hidráulico, a condiciones de operación mesofílica y termofílica.	17
Figura 8. Digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto. (1) Línea de captación de biogás con válvula de control, (2) Influyente, (3) Cama de lodos, (4) Efluente, (5) Sello hidráulico, (6) Medidor volumétrico de biogás Ritter, (7) Reservorio, (8) Fibra de vidrio.	25
Figura 9. Prueba de columna para determinar la composición de metano en el biogás. Spanjers y Vanrolleghem (2019).	27
Figura 10. Diseño para la purificación de biogás. (1) Digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto; (2) matraz liberador de presión; (3) medidor de biogás RITTER; (4) cámara de aire; (5) matraz liberador de presión; (6) cámara de aire; (7) matraz con NaOH 5M; (8) matraz filtro; (9) matraz con gel de sílice; (N) cotejo de la producción de biogás; (L) limpieza de biogás.....	35
Figura 11. Boceto de los reactores para el ensayo de PBM. (1) Botella de vidrio color ámbar; (2) corcho; (3) venoclisis; (3.1) cámara de goteo con punzón; (3.2) manguera o vía; (3.3) regulador de flujo con roller; (4) sitio de inyección; (5) medidor de biogás Ritter.....	36
Figura 12. Relación entre la temperatura de operación del DASEP y el tiempo de operación. T Min = temperatura ambiental mínima del día; T Prom = temperatura ambiental promedio del día; T Eff = temperatura del efluente o de operación del DASEP. Líneas verticales punteadas = inicio de cada corrida experimental.....	40
Figura 13. Relación del pH del influente y efluente respecto a los días de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.....	42
Figura 14. Relación entre la concentración inicial, final, y porcentaje de remoción de sólidos volátiles, respecto a los días de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.....	46

Figura 15. Relación entre la COV aplicada y removida, respecto al tiempo de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales. .48	48
figura 16. correlación entre la carga orgánica volumétrica removida y la carga orgánica volumétrica aplicada.49	49
Figura 17. Producción de biogás, cada 15 y 30 minutos.....51	51
Figura 18. Relación entre la producción de biogás, producción y porcentaje de metano. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.52	52
Figura 19. Tasa de producción de metano. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.¡Error! Marcador no definido.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 20. A) Rendimiento específico de biogás, B) Rendimiento específico de metano. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.....61	61
Figura 21. Comparación del rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación psicrófila.....62	62
Figura 22. Comparación del rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación mesófila y termófila.....64	64
Figura 23. Comparación del rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación psicrófila.65	65
Figura 24. Comparación del rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación mesófila y termófila.66	66
Figura 25. Modelaje del rendimiento específico de metano con la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 481.....71	71
Figura 26. Modelaje del rendimiento específico de metano con la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 483.....72	72
Figura 27. Modelaje del rendimiento específico de metano con la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 504.....72	72
Figura 28. Modelaje del rendimiento específico de metano con la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 525.....73	73
Figura 29. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 1.....73	73
Figura 30. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 2.....74	74
Figura 31. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 3.....75	75
Figura 32. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 4.....75	75

Figura 33. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 5.	76
Figura 34. Potencial bioquímico de metano.	78

TABLAS

Tabla 1. Investigaciones a condiciones de operación psicrófila, realizadas en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.	19
Tabla 2. Parámetros operacionales del digestor anaerobio de flujo semicontinuo a escala piloto.	24
Tabla 3. Parámetros que se midieron en el influente, efluente y biogás del digestor. ...	26
Tabla 4. Caracterización de los residuos orgánicos de cocina, lodos activados de purga concentrados y la codigestión.	38
Tabla 5. Parámetros operacionales de las corridas experimentales 1, 2 y 3.	43
Tabla 6. Parámetros operacionales de las corridas experimentales 4, 5 y 6.	44
Tabla 7. Trabajos de digestión anaerobia psicrófila, mesófila y termófila.	53
Tabla 8. Constantes cinéticas de la ecuación modificada de Gompertz, de acuerdo con la literatura.	70
Tabla 9. Caracterización de los sustratos empleados en el PBM.	77

Acrónimos

CH ₄	Metano
C ₀	Concentración inicial de sólidos volátiles del influente
C _e	Concentración final de sólidos volátiles del efluente
CoD	Mezcla de codigestión
COV ₀	Carga orgánica volumétrica aplicada
DA	Digestión anaerobia
DASEP	Digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto
ER _{sv}	Eficiencia de remoción de sólidos volátiles
LAP	Lodos activados de purga
LAPC	Lodos activados de purga concentrados
PB	Producción de biogás medida
PBM	Potencial bioquímico de metano
PM	Producción de metano medida
REB	Rendimiento específico de biogás
REM	Rendimiento específico de metano
RO	Residuos orgánicos
ROC	Residuos orgánicos de cocina
ROM	Residuos orgánicos municipales
RSU	Residuos sólidos urbanos
TRH	Tiempo de retención hidráulico
TRS	Tiempo de retención de sólidos
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
FM	Flujo másico
COV _{rem}	Carga orgánica volumétrica removida
TPB	Tasa de producción de biogás
TPM	Tasa de producción de metano
P _{CH₄TeoSTD}	Producción teórica de metano a condiciones estándar
P _{CH₄ExpSTD}	Producción experimental de metano a condiciones estándar

Resumen

La adecuada gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) se ha vuelto un importante desafío para los gobiernos debido a las grandes cantidades que las ciudades producen. El mal manejo de los RSU contribuye a la generación de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo, aire y cuerpos de agua debido a la generación de lixiviados, entre otros. Dentro de los RSU están los residuos orgánicos de cocina (ROC), los cuales están constituidos por cáscaras de frutas, verduras, restos de carne, sobras de comida preparada, etc. Un método de tratamiento para los ROC es la digestión anaerobia (DA), la cual produce biogás con metano, que puede ser usado para generar calor o electricidad. Los ROC se pueden mezclar con otros sustratos para mejorar el proceso de digestión, generando la codigestión (CoD). En este trabajo se investigó el rendimiento específico de metano (REM) modelado con la curva modificada de Gompertz, la producción de biogás (PB) y la eficiencia de remoción de sólidos volátiles (ER_{SV}) de un digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto (DASEP) operado a condiciones psicrófilas (≤ 20 °C). El DASEP operó a tres TRH de 70, 56 y 47 días con flujos de 1.0, 1.25 y 1.5 L/d, respectivamente, temperatura de calentamiento de la CoD de 25, 30 y 35 ° C y carga variable. Se realizaron seis corridas experimentales durante 207 días, con alimentación semicontinua de lunes a viernes con una CoD de ROC y lodos activados de purga concentrados (LAPC) obtenidos de la laguna aireada de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales. Durante las seis corridas experimentales la ER_{SV} varió entre 59.1 y 81.3 %, la PB varió entre de 55.9 y 128.1 L/d con un % de CH_4 entre 60.8 y 62.3 %, mientras que el REM varió entre 347.4 y 424.8 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}. Se obtuvieron rendimientos similares a digestores anaerobios operados a temperaturas mesofílicas y termofílicas, ahorrándose la energía de calentamiento. El REM fue modelado exitosamente con la curva modificada de Gompertz asumiendo la biodegradación de dos sustratos con diferentes constantes cinéticas. El metano generado podría utilizarse para preparar comidas sencillas en los hogares que los producen, lo cual se traduciría en un ahorro económico a largo plazo.

Abstract

The proper management of municipal solid waste (MSW) has become a major challenge for governments due to the large quantities that cities produce. Poor MSW management contributes to the generation of greenhouse gases, and contamination of soil, air, and water bodies due to leachates generation, among others. MSW includes organic kitchen waste (OKW), consisting of fruit peels, vegetables, leftover meat, food, etc. One treatment method for OKW is anaerobic digestion (AD), which produces biogas with methane, that can be used to generate heat or electricity. In this work, the specific methane yield (SMY) modeled with the modified Gompertz curve, the biogas production (BP), and volatile solids removal efficiency (v_sRE) of a pilot-scale semi-continuous anaerobic digester (PSSAD) operated at psychrophilic conditions (≤ 20 °C) were investigated. The PSSAD operated at three HRTs of 70, 56, and 47 days, with flow rates of 1.0, 1.25, and 1.5 L/d, co-digestion mixture heating temperatures of 25, 30, and 35 °C, and variable COV_o . Six experimental runs were conducted for 207 days, with semi-continuous feeding from Monday to Friday, using a co-digestion mixture of OKW and concentrated purge-activated sludge (CPAS), obtained from the aerated lagoon of a wastewater treatment plant. The v_sRE was of 59.1 and 81.3 %, BP was of 55.9 and 128.1 L/d; with a CH_4 -% of 60.8 and 62.3; and the SMY was of 347.4 and 424.8L- CH_4 /kg- VS_{added} . Similar performances were obtained to anaerobic digesters operated at mesophilic and thermophilic temperatures, thus saving heating energy. The SMY was successfully modeled with the modified Gompertz curve assuming the biodegradation of two substrates with different kinetic constants. The methane generated could be used to prepare simple meals in the households that produce them, resulting in long-term economic savings.

Introducción

Debido a las grandes cantidades de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en ciudades, su gestión es uno de los problemas que más enfrentan los gobiernos; la producción de RSU y la gestión inadecuada de estos, contribuye a la formación de gases de efecto invernadero y lixiviados que repercuten en la contaminación ya sea de suelos y cuerpos de agua, entre otros. Por ello, es necesario una gestión favorable y sostenible de los RSU (Wainaina et al., 2019). Los RSU están conformados por una fracción orgánica y otra inorgánica; la fracción orgánica de los RSU está conformada principalmente por residuos orgánicos generados en las cocinas de casas y restaurantes, seguida de residuos orgánicos de jardines.

Un método de tratamiento para los residuos orgánicos de cocina (ROC) es la digestión anaerobia (DA) que produce biogás con metano (CH_4), un combustible, y digestato o efluente, que puede ser utilizado como abono para la mejora del suelo y/o para el arranque de nuevos digestores (Möller y Müller, 2012). Por otro lado, si los ROC se separan desde el origen, es decir, las cocinas de las casas habitación, esta materia orgánica no contaminaría el medio ambiente en su trayecto al vertedero y en el vertedero mismo.

La temperatura de operación ha sido uno de los parámetros más discutidos en la DA ya que controla la selección de microorganismos y su tasa de crecimiento. La DA psicrófila es una alternativa atractiva en zonas con temperaturas ambientales templadas, pues se podría ahorrar la energía de calentamiento del digestor o reactor; sin embargo, en condiciones psicrófilas, el rendimiento específico de CH_4 (REM) es menor que en condiciones mesófilas y termófilas (Rajagopal et al., 2017).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es operar a baja temperatura un digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto (DASEP) mediante una mezcla de ROC y lodos activados de purga concentrados (LAPC), para así verificar su rendimiento en términos de producción de biogás (PB), eficiencia de remoción de sólidos volátiles (SV) y REM. Se espera que los resultados sean similares a digestores operados en condiciones mesófilas. Se utilizará el LAPC, debido a problemáticas económicas y ambientales; en el aspecto económico, con el objetivo de disminuir los costos ligados a su evacuación, ya que esto

implica un monto económico alto en las plantas de tratamiento de aguas residuales. En la parte ambiental, darles un tratamiento para que no representen un riesgo a la salud (Mahamud et al., 1996).

Antecedentes

En México, se generan cada día alrededor de 102,895 toneladas de RSU, de los cuales el 52.4 % corresponden a ROC (Semarnat, 2015). Dichos ROC provocan malos olores durante su descomposición y con ello la creación de nuevos vectores de infecciones, así como altas emisiones de CH₄ a la atmosfera (Rajagopal et al., 2017).

Por lo tanto, es esencial un método efectivo para el control y tratamiento de los ROC, para así tener un manejo sustentable del medio ambiente. Dentro de las opciones disponibles para la eliminación de desechos orgánicos sólidos están la incineración, gasificación y pirólisis. Sin embargo, estos métodos involucran la combustión de desechos orgánicos mediante niveles bastante altos de temperatura y energía (Tangri y Wilson, 2017). Otra opción que resulta más efectiva para el tratamiento de los ROC es la DA, que no precisa de la inversión de energía externa.

Digestión anaerobia

La DA es un método utilizado en la remoción de RO, donde se han obtenido resultados exitosos, mostrando un gran potencial en la parte social y ambiental. Proporcionando un combustible amigable con el ambiente a partir de materias primas renovables con la recuperación de nutrientes si el producto final se utiliza como fertilizante y/o abono. La DA ocurre en ausencia de oxígeno, a través de un proceso que consiste en la degradación de residuos domésticos e industriales por acción de distintos consorcios microbianos, donde el producto final es el biogás (CO₂ y CH₄) (Parra-Huertas, 2015). Dentro de los beneficios de la DA se encuentra la producción de biogás con CH₄, el cual puede ser utilizado en hogares para preparar alimentos; otro beneficio es la disminución del CH₄ atmosférico que se genera en los tiraderos a cielo abierto, reduciendo los gases de efecto invernadero (Rajagopal et al., 2015).

Digestión anaerobia a baja temperatura

La temperatura es un factor muy importante en el proceso de DA, esto para que los microorganismos puedan tener una actividad metabólica óptima. Sin embargo, Rajagopal et al. (2015) reporta que la DA a baja temperatura (psicrofílica) es exitosa, esto debido a los

niveles más bajos de nitrógeno amoniacal libre que se presentan, en comparación con los procesos mesofílicos o termofílicos. Por lo tanto, la DA psicrófila es una solución factible para los desechos orgánicos municipales y agrícolas, debido a que opera a baja temperatura (≤ 20 °C) sin necesidad de mezclas adicionales, lo que da como resultado un balance energético positivo durante todo el año, incluso en climas fríos.

Biogás

El biogás se produce por microorganismos metanógenos durante el proceso de DA, al degradar materia orgánica en ausencia de oxígeno. Está constituido por distintos gases, entre ellos CH₄ (60 %), CO₂ (38 %) y el 2 % restante pertenece a nitrógeno, vapor de agua y sulfuro de hidrógeno (Plasencia, 2021).

Parámetros que inciden en el proceso de digestión anaerobia

Existen varios parámetros, principalmente de tipo fisicoquímico, que inciden en la DA y que se describen a continuación.

pH

En el proceso de DA este parámetro es de suma importancia, debido a que el consorcio de microorganismos requiere de un pH cercano a la neutralidad para tener un desarrollo óptimo. El pH más favorable para este tipo de consorcios es de 6.7 y 7.5 (Avendaño, 2010). Las causas por las cuales el pH puede descender son: a) un cambio abrupto en la carga orgánica volumétrica aplicada (COV_o); b) permanecer un largo periodo de tiempo sin recibir alimento; c) la presencia de productos tóxicos en el alimento; d) un cambio repentino en la temperatura interna del reactor (Veyna, 2007).

Nutrientes

En el proceso de DA es sumamente importante tener un equilibrio de nutrientes en el sistema para que los microorganismos se adapten, proliferen, degraden la materia orgánica y generen mayores rendimientos en la PB. Los nutrientes esenciales en el proceso de DA son nitrógeno (N), carbono (C) fósforo (P) y azufre (S), entre otros. El C es utilizado por los microorganismos para la obtención de energía y el N propicia la síntesis de nuevas

proteínas. En el caso de Abbasi et al. (2012), indican que una relación óptima de los elementos C/N es de 20:1 y 30:1. Por otro lado, Deublein y Steinhauser (2011) afirman una relación de 16:1 a 25:1. Si la proporción de C en el medio es baja, la PB disminuirá y habrá una acumulación de ácidos que repercuten de manera negativa en el crecimiento de los microorganismos, propiciando inhibición parcial o total de estos. En el caso del N, si la relación es baja, la síntesis de proteínas disminuye y con ello, el rendimiento del reactor y la PB disminuye. Si hay un exceso de N, se puede acumular exceso de amoníaco el cual es perjudicial para los microorganismos (Avendaño, 2010).

Tiempo de retención hidráulico

Se refiere al tiempo promedio necesario en el que un líquido, ya sea un agua residual o un lodo, se mantiene dentro del reactor o digestor para que los microorganismos cumplan con su función. Ahning (2003) menciona que el TRH se calcula dividiendo el volumen de reactor entre el caudal de alimentación y se expresa en unidad de tiempo. En condiciones de operación mesofílicas este no debe ser menor de 10 a 15 días y en condiciones psicrófilicas de 20 a 50 d (Álvarez et al., 2006).

Carga orgánica volumétrica aplicada

Este parámetro al igual que el TRH y la concentración de sólidos volátiles en el influente (C_0) del DASEP, son de suma importancia en el proceso de DA. La COV_0 se puede expresar como masa de demanda química de oxígeno (DQO) o sólidos volátiles (SV) por unidad de volumen y tiempo (Avendaño, 2010). Un valor alto puede inducir la acidificación del sistema, debido a una acumulación excesiva de materia orgánica sin digerir, lo cual repercute en el descenso del pH y una desestabilización interna en el DASEP (Lindmark et al., 2014).

Lodos activados de purga

Los lodos activados de purga (LAP) son el residuo generado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados; estos se purgan de manera constante para tener un equilibrio dentro del reactor y evitar su acumulación excesiva. Debido a su producción excesiva, se buscan tratamientos adecuados que permitan una

utilización de los LAP, ya que más de un 40 % de los gastos de operación en una PTAR corresponde justo al tratamiento y disposición final de estos (Mahamud et al., 1996).

Codigestión de residuos

La codigestión de residuos se refiere a la mezcla de dos o más sustratos en el proceso de DA. La codigestión tiene la finalidad de obtener un equilibrio o balance de nutrientes para el óptimo desarrollo de los microorganismos involucrados en el proceso, tal es el caso del carbono y el nitrógeno. De acuerdo con la literatura, un buen equilibrio de carbono y nitrógeno repercute en un aumento de la PB (Bouallagui et al., 2009).

Modelos cinéticos para el rendimiento específico de metano

El REM se ha ajustado a diversas ecuaciones, por ejemplo, ecuaciones lineales, exponenciales y gaussianas. En la ecuación lineal: $y = a + bt$, el REM aumenta linealmente y al alcanzar un punto máximo, disminuye linealmente a cero, al igual que en el modelo exponencial: $y = a + b \exp(cT)$, ambos indican un REM inestable en la parte ascendente y descendente de la curva. En la ecuación de Gauss: $y = a \exp[-0.5(T - T_0/b)^2]$ el REM sigue una distribución normal durante un pequeño periodo de tiempo. La ecuación gaussiana simula el REM, para distintos rangos de temperaturas (Budiyono y Sumardiono, 2013; Das-Ghatak y Mahanta, 2014).

Curva de Gompertz

La curva de Gompertz originalmente fue empleada para modelar el comportamiento de cierto tipo de microorganismos en reactores de tipo batch, la cual presenta un crecimiento sigmoideal (Zwietering et al. 1990). No obstante, Lay et al. (1996) realizaron una modificación en ella, para así poder modelar la PM en reactores de tipo batch con un volumen de 0.12 L. La curva de Gompertz muestra una fase de iniciación o lag-phase (λ) donde la producción de biogás o metano es lenta, debido a la adaptación de los microorganismos al sustrato. Enseguida se observa una fase de crecimiento exponencial (R_m), donde se produce la mayor cantidad de biogás o metano. Finalmente, una fase estacionara (P) que indica el consumo del sustrato y por ende una disminución en la producción de biogás o metano (Figura 1).

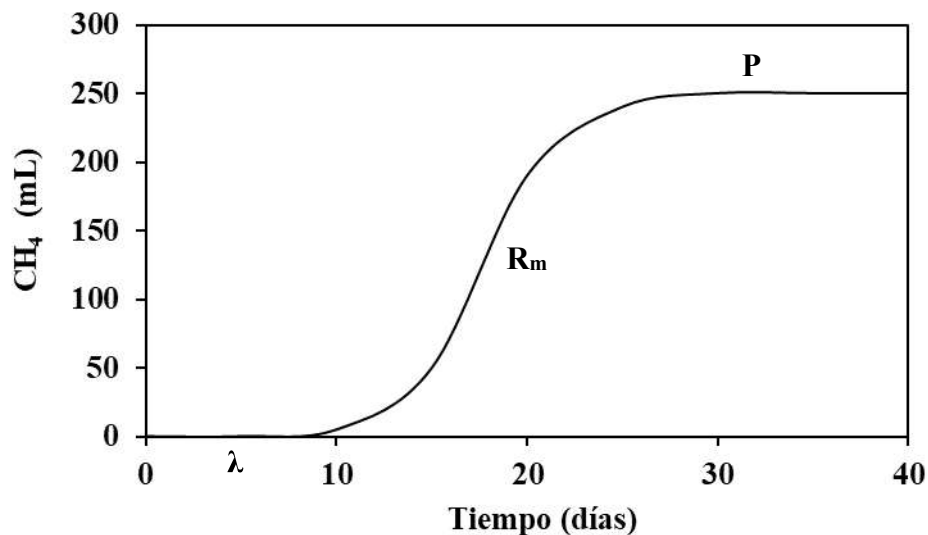


Figura 1. Curva del comportamiento de metano y constantes cinéticas de la ecuación modificada de Gompertz. Lay et al. (1996).

En el caso de Lay et al. (1996) modeló el volumen de biogás acumulado respecto al tiempo de operación, no obstante, existen demás autores que de igual manera han modelado el comportamiento del CH₄ con base en la ecuación modificada de Gompertz. Tal es el caso de Nielfa et al. (2015), donde modeló el REM (mL-CH₄/g-SV_{añadidos}) respecto al tiempo de operación (Figura 2).

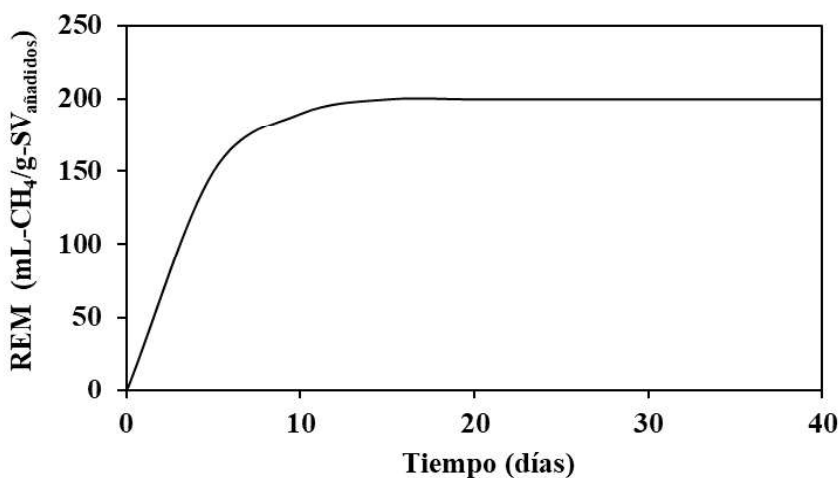


Figura 2. Curva del rendimiento específico de metano con la ecuación modificada de Gompertz. Nielfa et al. (2015).

La ecuación modificada de Gompertz es utilizada de distintas maneras, de acuerdo con las necesidades de cada investigación. En el actual trabajo, se empleó la ecuación (Ecuación 1) utilizada por Barrera-Quintero et al. (2017), la cual se expresa a continuación:

$$REM = H_{m\acute{a}x} * e^{-e^{\left[\frac{R_{m\acute{a}x} * e^1}{H_{m\acute{a}x}}(\lambda_0 - t) + 1\right]}}$$

Ecuación 1. Ecuación modificada para la obtención del rendimiento específico de metano.

Dónde: REM= rendimiento específico de CH₄ (L-CH₄/kg-SVañadidos); H_{máx}= cantidad máxima producida de CH₄, cuando el sustrato ya se consumió (L-CH₄/kg-SVañadidos); R_{máx}= velocidad o tasa de producción de CH₄ (L-CH₄/ kg-SVañadidos/d); λ₀= tiempo requerido para la producción inicial de CH₄ (días). t= tiempo total desde el inicio hasta el final de la producción de CH₄ (días). La ecuación modificada de Gompertz se utilizó en esta investigación para modelar la producción y el rendimiento de CH₄ bajo diferentes COV_o, así como para evaluar los cambios en las constantes cinéticas del modelo en función de la COV_o.

Estado del arte de la digestión anaerobia

Se han realizado distintas investigaciones de DA con rangos de temperatura de operación psicrófila (Figura 3), mesófila y termófila (Figura 4). En la Figura 3 se aprecian seis investigaciones sobre la relación entre el rendimiento específico de metano (REM) y el tiempo de retención hidráulico (TRH). Se observa que medida que el TRH incrementa, el REM también aumenta, esto de manera proporcional. Por otro lado, Saady y Massé (2015) utilizaron un TRH de 21 días y el REM fue de 84 a 102 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Rajagopal et al. (2017), utilizaron un TRH de 161 a 181 días, con REM de 380 a 700 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Otro caso es el de Alcaraz-Ibarra (2019) donde utilizó TRH de 40 a 120 días en tres corridas experimentales, en la corrida 1 el REM fue de 199 a 271 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}; en la corrida 2 de 50 a 160 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} y en la corrida 3 de 158 a 280 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}.

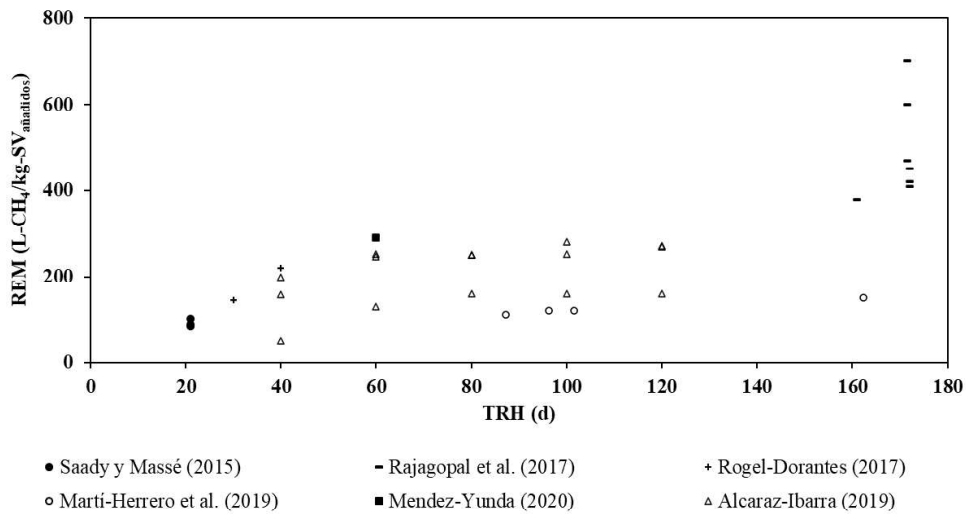


Figura 3. Relación entre el rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación psicrófila.

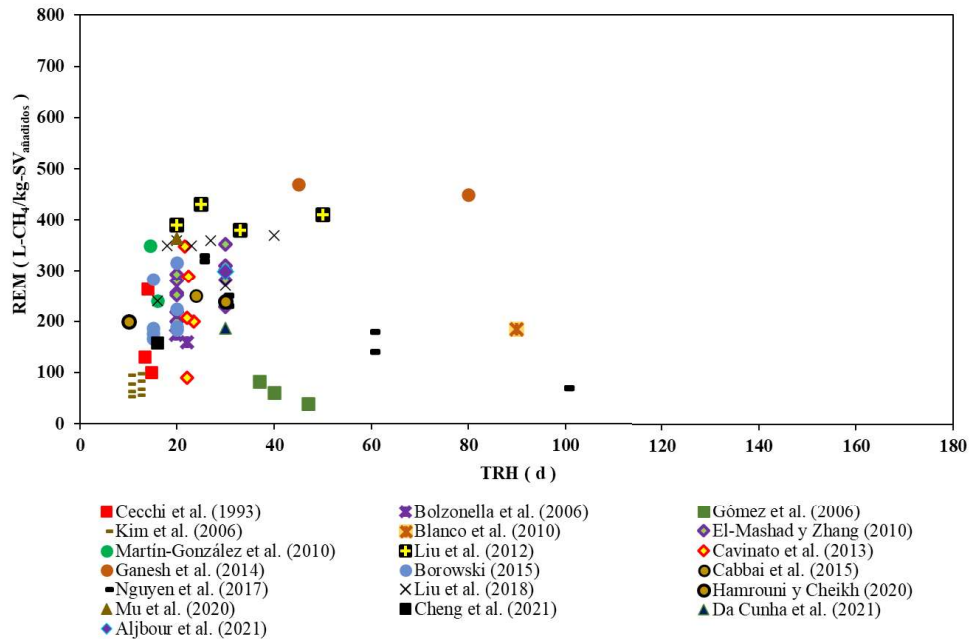


Figura 4. Relación entre el rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulica a condiciones de operación mesofílica y termofílica.

En la Figura 4 se compara el REM de veinte investigaciones a condiciones mesofílicas y termofílicas; se visualiza que la mayoría de los autores manejan un TRH de 10 a 40 días, con un REM en el intervalo de 100 a 400 L-CH₄/kg-SVañadidos. Sin embargo, Nguyen et al. (2017) utilizaron un TRH de 60 a 100 días y el REM disminuyó de 180 a 70 L-CH₄/kg-SVañadidos. Blanco et al. (2010) utilizó un TRH de 90 días, el REM fue de 180 L-CH₄/kg-SVañadidos. Ganesh et al. (2014) utilizó un TRH de 80 días, el REM fue de 450 L-CH₄/kg-SVañadidos.

En la Figura 5 se visualiza la relación entre el REM y la COV_o a condiciones de operación psicrófilicas. En este caso, debido a las bajas temperaturas de operación, las COV_o suelen estar en el rango de 0.31 a 2.0 g-SV/L/d con un REM de 100 a 300 L-CH₄/kg-SVañadidos. No obstante, Saady y Massé (2015) utilizaron COV_o de 4, 5 y 6 g-SV/L/d y obtuvieron un REM de 102, 88 y 84 L-CH₄/kg-SVañadidos, respectivamente. En el caso de Rajagopal et al. (2017), usaron COV_o de 0.8 a 4.2 g-SV/L/d y un REM de 380 a 700 L-CH₄/kg-SVañadidos, respectivamente.

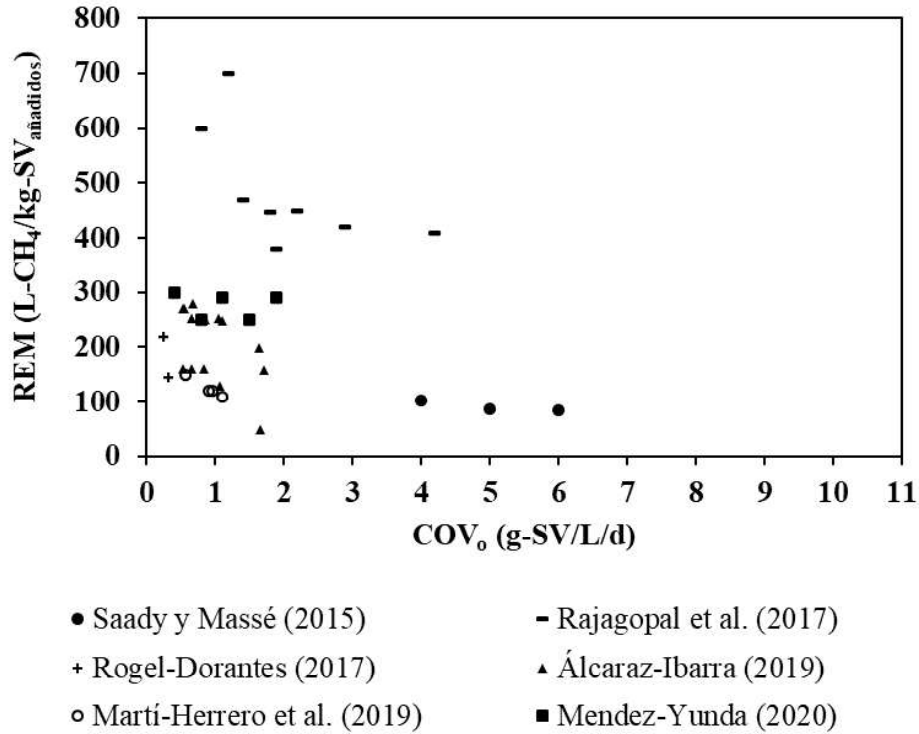


Figura 5. Relación entre el rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación psicrófila.

En la Figura 6 se percibe la relación entre el REM y la COV_o , a condiciones de operación mesófila y termófila. Se evaluaron un total de 28 artículos, en los cuales se aprecia una alta dispersión de los datos. Pese a ello, se aprecia que cuando las COV_o están en el rango de 0.26 a 4.0 g-SV/L/d, el REM es de 150 a 400 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Son pocos los trabajos que utilizan COV_o mayores a 4 g-SV/L/d, esto puede ser a que se alcanza la capacidad máxima en los reactores, induciendo desestabilización en el sistema.

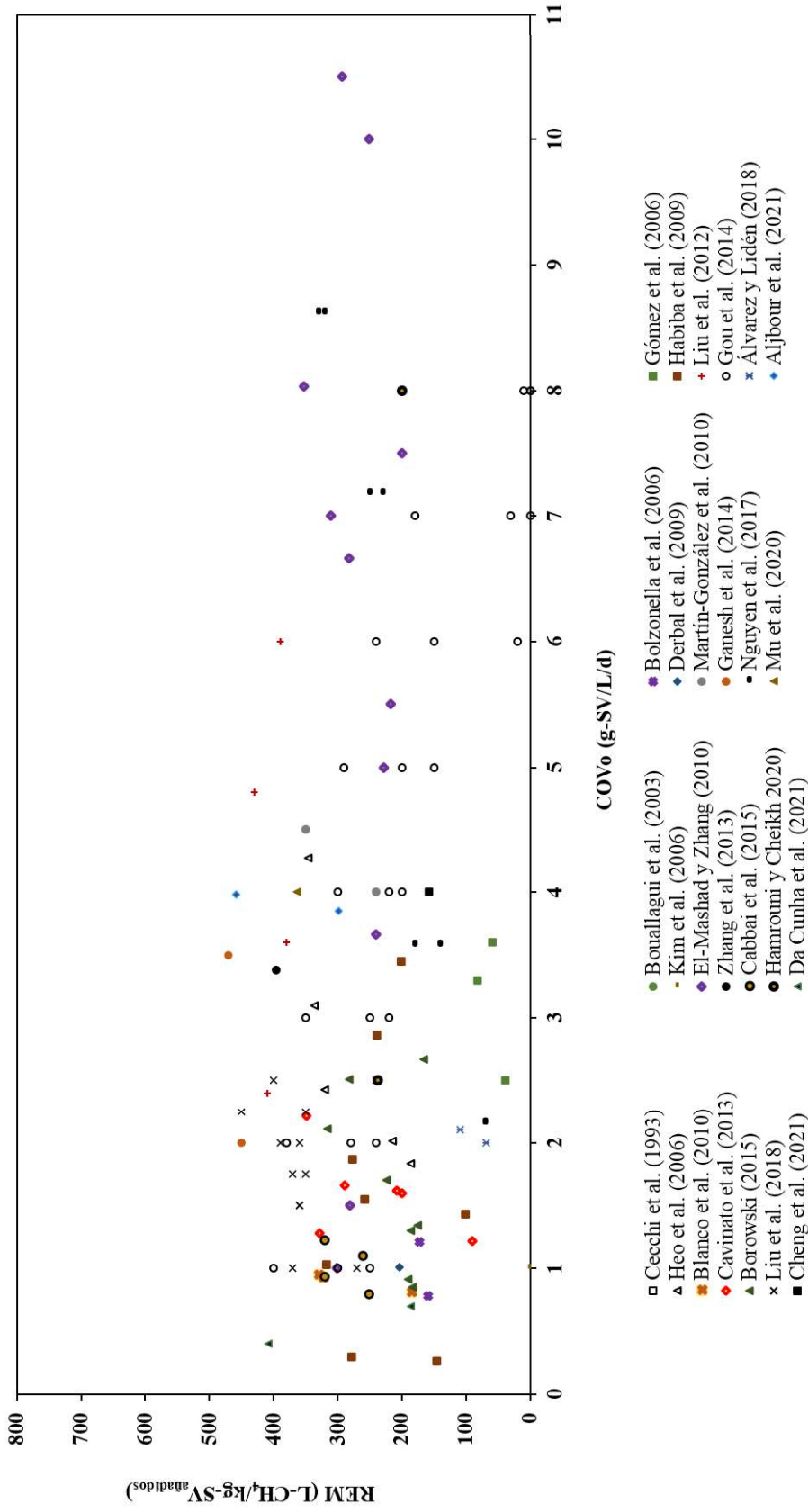


Figura 6. Relación entre el rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación mesofílica y termofílica.

En la Figura 7 se analiza la relación entre la COV_o y el TRH, a condiciones de operación psicrófila. Se evaluaron un total de 6 artículos, de los cuales 2 se sitúan a los extremos, en el caso de Saady y Massé, 2015 el TRH fue de 21 días y la COV_o de 4, 5 y 6 g-SV/L/d; Rajagopal et al. (2017) utilizaron TRH de 172, 172, 172, 181, 161, 172, 172 y 172 días y COV_o de 0.8, 1.2, 1.4, 1.8, 1.9, 2.2, 2.9 y 4.2 g-SV/L/d, respectivamente; las siguientes 4 investigaciones, presentan TRH de 30 a 120 días y COV_o de 0.25 a 1.9 g-SV/L/d.

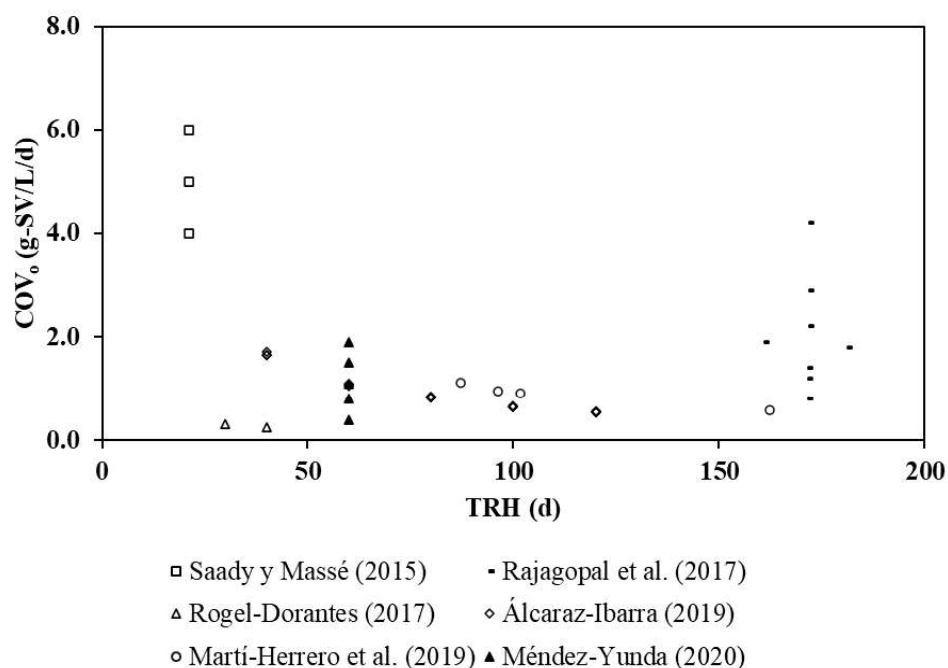


Figura 7. Relación entre la carga orgánica volumétrica aplicada y el tiempo de retención hidráulico, a condiciones de operación psicrófila.

En la Figura 8 se analiza la relación entre la COV_o y el TRH, a condiciones de operación mesofílica y termofílica. Se evaluaron un total de 26 trabajos, de los cuales, 23 utilizaron un TRH en el rango de 4.2 a 40 días y COV_o de 0.26 a 8 g-SV/L/d. Mientras que Blanco et al. (2010), Ganesh et al. (2014) y Nguyen et al. (2017) operaron a TRH de 25 a 100 días, con COV_o de 0.8 a 8.6 g-SV/L/d.

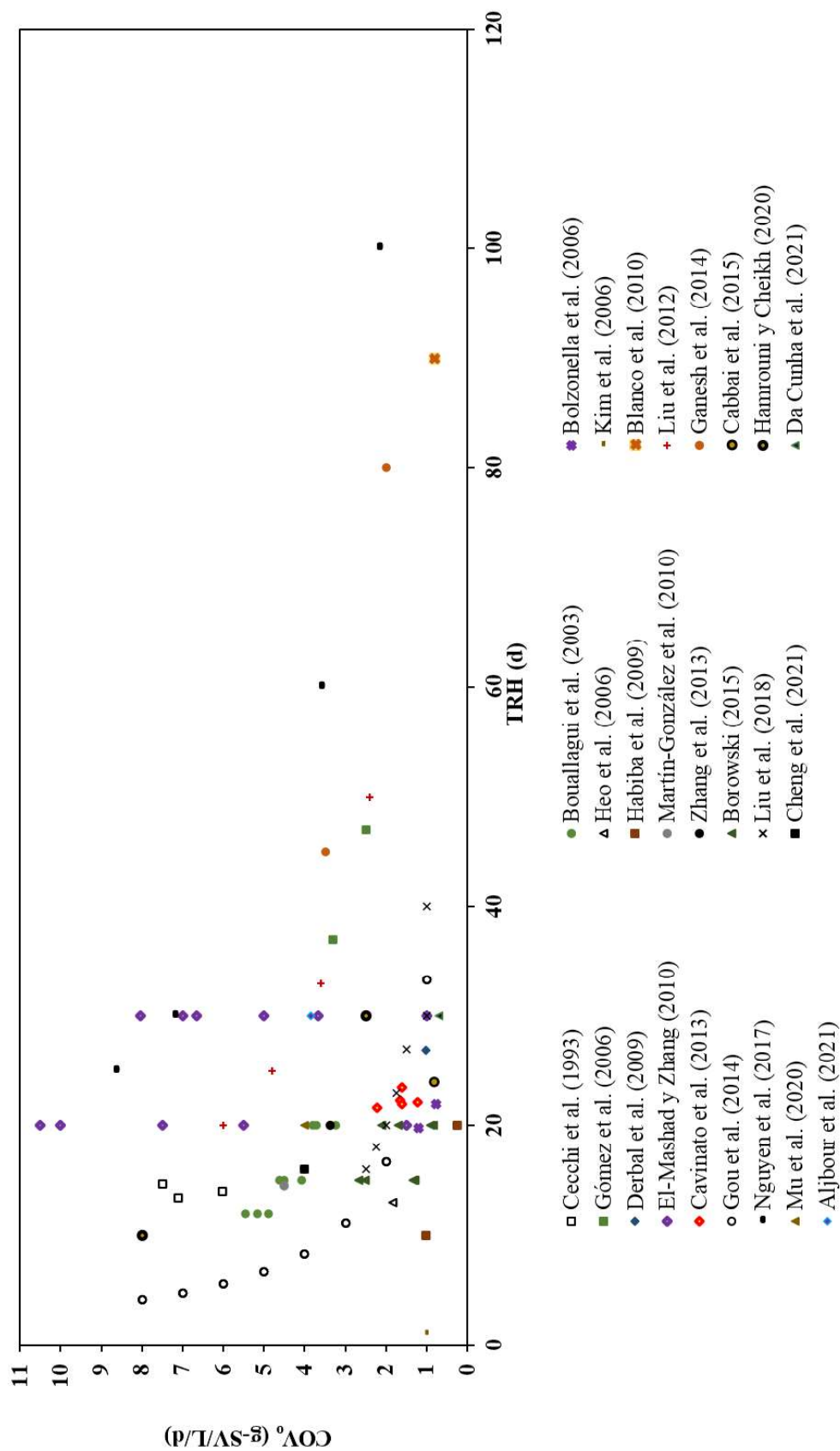


Figura 8. Relación entre la carga orgánica volumétrica aplicada y el tiempo de retención hidráulico, a condiciones de operación mesofílica y termofílica.

En el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, se han realizado tres investigaciones de DA a condiciones psicrófilas, las cuales se exponen en la Tabla 1. En el caso de Rogel-Dorantes (2017), trabajó con 4 digestores a escala laboratorio, con 4 modos de operación (fosa séptica sin sello hidráulico, fosa séptica con sello hidráulico, mezcla mecánica, pretratamiento de lodo), TRH de 30 y 40 días, volumen de 11 L y el sustrato fue LAP concentrado (LAPC).

La conclusión de este trabajo fue que el modo de operación no influye en el % de CH₄ y que el mejor modo de operación es la fosa séptica con sello hidráulico. Sin embargo, las COV_o fueron demasiado bajas (0.25 y 0.31 g-SV/L/d), debido a que no se pudo obtener una concentración alta del LAPC.

Alcaraz-Ibarra (2019) logró obtener COV_o más altas (1.71, 1.1, 0.85, 0.67 y 0.55 g-SV/L/d) gracias a la CoD de ROC y LAPC. Sin embargo, debido a que los ROC tienen alta heterogeneidad se optó por usar una receta como la de un sustrato sintético, que incluía frutas, verduras y carne de cerdo. Se utilizaron 5 digestores, con un TRH de 40 a 120 días (esto influyó en la obtención de COV_o diferentes).

La conclusión de este trabajo fue que el REM resultó ser similar para los distintos TRH y que el TRH de 40 días fue insuficiente para garantizar que el digestor no se acidificara. En cambio, el TRH de 60 días es el TRH adecuado porque representa un volumen de digestor más pequeño si se desea escalar.

Méndez (2020) operó 5 digestores a escala laboratorio, con una CoD de LAPC y ROC (formula), COV_o variable y TRH constante de 60 días. La conclusión fue que el REM es influenciado por la COV_o y que el % de CH₄ disminuía a medida que la COV_o se incrementaba.

Los trabajos previos han sentado las bases para la operación y monitoreo de este tipo de sistemas de DA. Por lo anterior, en esta investigación se implementó un digestor anaerobio a escala piloto con un volumen de 70 L, TRH variable de 70 y 47 días, alimentado con una CoD con ROC y LAPC.

Tabla 1. Investigaciones a condiciones de operación psicrófila, realizadas en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	Q (L/d)	TRH (d)	COV _o (g-SV/L/d)	CH ₄ (%)	PB (L-Biogás/d)	PM (L-CH ₄ /d)	REB (L-Biogás/kg-SV añadidos)	REM (L-CH ₄ /kg-SV añadidos)
Rogel-Dorantes (2017)	LAPC	20	11	0.28 0.37	40 30	0.25 0.31	82 82	0.44 0.60	0.36 0.50		220 145
				0.28	40	1.65	64.50	5.71	3.68	309	199
				0.18	60	1.06	66.00	4.39	2.90	383	253
				0.14	80	0.82	66.40	3.37	2.24	380	250
				0.11	100	0.65	66.50	2.71	1.80	379	252
				0.09	120	0.53	66.70	2.33	1.55	400	271
				0.28	40	1.66	64.50	1.26	0.81	68	50
Alcaraz-Ibarra (2019)	ROC + LAPC	20	11	0.18 0.14 0.11 0.09	60 80 100 120	1.07 0.83 0.65 0.53	66.00 66.40 66.50 66.70	2.40 2.17 1.74 1.42	1.58 1.44 1.16 0.95	200 240 243 240	130 160 160 160
				0.28	40	1.71	72.00	4.19	3.02	230	158
				0.18	60	1.10	72.00	4.08	2.94	340	247
				0.14	80	0.85	72.00	3.24	2.33	350	250
				0.11	100	0.67	72.00	2.81	2.02	380	280
				0.09	120	0.55	72.00	2.23	1.61	380	270
Méndez-Yunda (2020)	ROC + LAPC	20	11	0.18	60	1.90 1.50 1.10 0.80 0.40	64.20 64.20 67.90 68.30 72.30	9.10 9.10 5.20 3.00 1.70	5.84 5.84 3.53 2.05 1.23	460 390 430 360 410	290 250 290 250 300

T_{op}= temperatura de operación; V= volumen del reactor; Q= flujo o caudal del reactor; TRH= tiempo de retención hidráulico; COV_o= carga orgánica volumétrica aplicada; PB= producción de biogás; PM= producción de metano; REB= rendimiento específico de biogás; REM= rendimiento específico de metano.

Justificación contextual y científica

De acuerdo con Semarnat (2015), se produjeron cerca de 53.1 millones de toneladas de residuos correspondientes a RSU en México, esta cifra es mayor en un 61.2 % respecto a datos obtenidos en el 2003 y el promedio diario por cada habitante es de 1.2 kg/ha. De los 53.1 millones toneladas de RSU, el 52.4 % (27.8 millones de toneladas) corresponden a los ROC, lo que los convierte en un problema serio para su disposición y en un área de oportunidad para ser utilizado como sustrato en un proceso de DA.

La DA es el tratamiento más utilizado para tratar los ROC; las ventajas de la DA son: el bajo consumo de energía, la conversión del material orgánico a biogás (que puede aprovecharse para obtener energía o calor), la baja producción de lodos de purga y la utilización del digestato o efluente para el arranque de nuevos reactores anaerobios o su utilización como abono después de un proceso de secado (Acosta y Abreu, 2005).

Por otra parte, comprender el comportamiento del REM, es muy importante, porque brinda la oportunidad de diseñar una ruta acertada de diversos parámetros operacionales, para así garantizar un manejo seguro y óptimo de digestores anaerobios (DAN) (Barrera-Quintero et al., 2017). Es por ello por lo que se han probado diferentes modelos matemáticos para describir el REM a lo largo del proceso de DA, los cuales son: modelo lineal, exponencial, Gompertz y Gause, los cuales no describen una correcta cinética, ya que subestiman el REM al inicio del proceso y también en la fase exponencial.

En cambio, el modelo modificado de Gompertz se ha usado en diversas investigaciones, mostrando resultados exitosos ante el comportamiento del REM y a su vez, pronosticando la curva, etapas y puntos de inflexión que son puntos clave y críticos en el diseño de DAN (Noguera et al., 2004 y Aljbour et al., 2021).

En esta investigación se busca la implementación de tecnologías económicamente sostenibles y ambientalmente amigables como la codigestión anaerobia de ROC y LAPC. En el caso de los LAPC, darles un uso y reducir los costos de su respectivo tratamiento de evacuación, y en el caso de los ROC, propiciarles una disposición final para la producción

de biogás, evitando la problemática ambiental, tal es el caso de la generación de los lixiviados, produciendo energía limpia y subproductos.

Hipótesis

El rendimiento específico de metano de un digestor anaerobio de flujo semicontinuo a escala piloto (DASEP) operado a condiciones psicrófilicas ($\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), será similar al rendimiento específico de metano de un digestor mesofílico y se ajustará a la curva modificada de Gompertz.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el rendimiento de un digestor anaerobio de flujo semicontinuo a escala piloto (DASEP) operado a condiciones psicrófilicas ($\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) y carga orgánica volumétrica variable, mientras que el rendimiento específico de metano ($\text{L-CH}_4/\text{kg-SV}_{\text{añadidos}}$) se ajustará a la curva modificada de Gompertz.

Objetivos específicos

- Arrancar y operar un digestor anaerobio de flujo semicontinuo a escala piloto (DASEP) a condiciones psicrófilicas ($< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Medir los parámetros fisicoquímicos (pH, T, contenido de SV y ST) de los ROC, el LAPC, la CoD, el efluente y la cama de lodos del DASEP.
- Evaluar la producción de biogás y el porcentaje de metano del biogás en el digestor.
- Analizar las curvas de producción de metano y obtener el rendimiento específico de metano para ajustarlo matemáticamente a la curva modificada de Gompertz.

Materiales y Métodos

1. Residuos orgánicos de cocina

Los ROC que se usaron durante esta investigación se obtuvieron diariamente de cinco cocinas de hogares de Toluca de Lerdo, México. Los ROC consistieron principalmente en restos de comida preparada, cáscaras o restos podridos de fruta y verdura que son segregados desde el origen. Cada semana se recolectaron y utilizaron aproximadamente de 5 a 7 kg de ROC.

2. Lodo activado de purga concentrado

El LAP fue obtenido de la laguna aireada de una PTAR que trata aguas residuales de una empresa chocolatera. Con el fin de concentrar el LAP (incrementar los g-SV/L), éste se filtró durante 24 horas a través de una tela de poliéster, aumentando los SV de 14.35 a 66.38 g-SV/L. El LAPC obtenido, se almacenó en refrigeración (4 °C) hasta su uso. Se utilizaron 1.5 L de LAPC semanalmente para la preparación de la CoD (75 % ROC: 25 % LAPC), esto para las corridas con un caudal de 1 L/d; para las corridas con caudal de 1.25 L/d se utilizó 1.8 L de LAPC y para la corrida de 1.5 1 L/d se utilizaron 2.1 L de LAPC.

3. Codigestión de residuos orgánicos de cocina con lodo activado de purga concentrado

El sustrato que se usó para alimentar el DASEP corresponde a una CoD. Se realizó CoD con la finalidad de mejorar la relación C/N del sustrato de CoD, ya que los ROC tienen una alta concentración de carbono, pero una baja concentración de nitrógeno, mientras el LAPC tiene una baja concentración de carbono y una alta concentración de nitrógeno (Alcaraz-Ibarra, 2019 y Méndez, 2020).

Aproximadamente 750 mL o g de ROC y 250 mL o g de LAPC se trituraron durante 5 min con una licuadora comercial de la marca Oster (120 V, 700W) hasta obtener una mezcla homogénea con una concentración entre 80 y 100 g-SV/L. La CoD se preparó los lunes para alimentar el DASEP cinco días de la semana y esta se almacenó a 5 ° C en un refrigerador convencional hasta su uso. Se realizaron seis corridas experimentales en las

cuales la temperatura de calentamiento de la CoD y el flujo de entrada fueron las variables que se modificaron en cada una de las corridas (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros operacionales del digestor anaerobio de flujo semicontinuo a escala piloto.

Corrida	Fecha	T_{CoD} (°C)	Q (L/d)	TRH (d)	C_o (g-SV/L)	COV_o (g-SV/L/d)
1	01/09/22 – 30/09/22	25			109.1 ± 10.0 (9)	1.6 ± 0.1 (9)
2	21/10/22 – 25/11/22	30	1.0	70	91.4 ± 9.2 (19)	1.3 ± 0.1 (19)
3	28/11/22 – 30/12/22	35			94.3 ± 9.0 (17)	1.4 ± 0.1 (17)
4	01/01/23 – 03/02/23	25	1.25	56	87.7 ± 6.0 (13)	1.6 ± 0.1 (13)
5	06/02/23 – 10/03/23	30			91.2 ± 5.6 (13)	1.6 ± 0.1 (13)
6	13/03/23 – 14/04/23	25	1.5	47	83.9 ± 5.9 (9)	1.7 ± 0.3 (9)

T_{CoD} = Temperatura de calentamiento de la CoD; Q = Flujo o caudal; TRH = Tiempo de retención hidráulico; COV_o = Carga orgánica volumétrica aplicada; ± = Desviación estándar. Valores entre paréntesis indican la cantidad de datos promediados.

4. Digestor anaerobio semicontinuo escala piloto

El experimento se llevó a cabo en un DASEP construido con dos recipientes de plástico comercial, cada uno con un volumen aproximado de 70 L, tubería de PVC para el influente, efluente y la línea de conducción de biogás. Se utilizó fibra de vidrio, esferas de poliestireno y madera como material aislante (Figura 9).

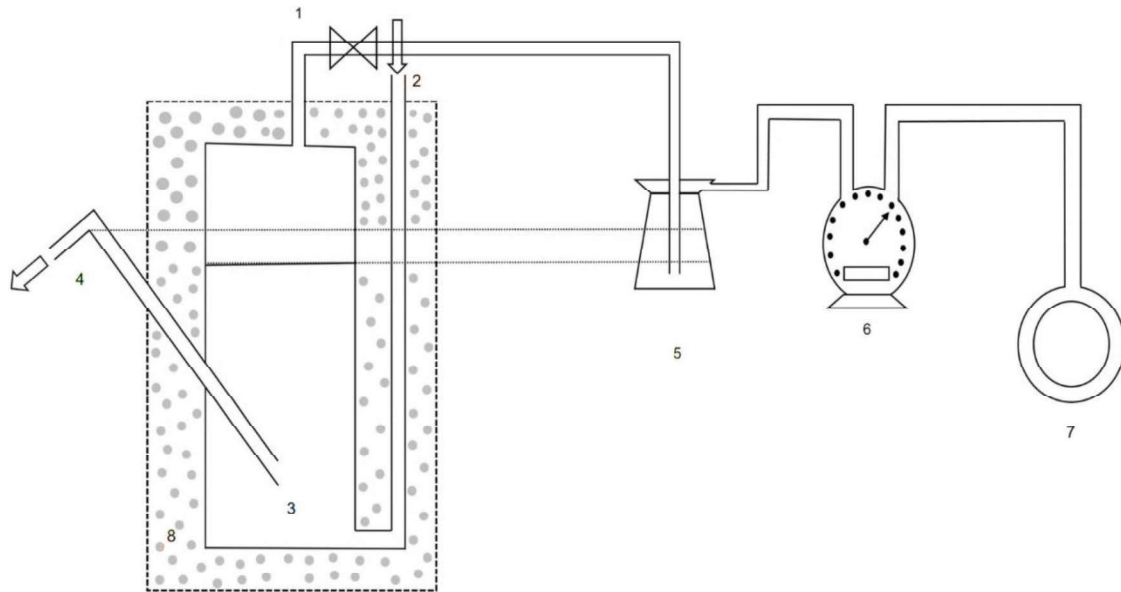


Figura 9. Digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto. (1) Línea de captación de biogás con válvula de control, (2) Influyente, (3) Cama de lodos, (4) Efluente, (5) Sello hidráulico, (6) Medidor volumétrico de biogás Ritter, (7) Reservorio, (8) Fibra de vidrio.

Para alimentar el DASEP, se procedió a cerrar la válvula de control de la línea de captación de biogás (1), posteriormente, se introdujo la CoD por el influente (2) con la ayuda de un embudo y un palillo de madera, con movimientos constantes impulsando la mezcla hacia dentro. En la parte inferior del DASEP se ubica la cama de lodos (3) que consiste en un consorcio de microorganismos, entre ellos, arqueas metanógenas que generaron el metano del biogás tras la descomposición de la materia orgánica adicionada. A la par de la alimentación, se recolectó el digestato o efluente (4). Al finalizar la alimentación, se abrió la válvula de control de la línea de captación de biogás (1) para permitir el flujo de este hacia el matraz Kitasato (5) el cual funge como un sello hidráulico. Enseguida, el biogás fluyó hacia el medidor de biogás de la marca Ritter (6) para contabilizar el volumen de biogás generado por los microorganismos. Finalmente, el biogás siguió su flujo hacia la cámara de aire (7) para almacenarse; al día posterior se contabilizó el volumen de biogás producido, el porcentaje de CH_4 y se quemó el biogás en una cámara de combustión que consistió en un mechero Bunsen y una caja de madera aislada con placas de poliestireno, para evitar su liberación a la atmósfera y el incremento de los gases de efecto invernadero.

5. Estrategia de operación

Durante esta investigación se operó un DASEP con 3 TRH (70, 56 y 47 d) y 3 flujos (1.0, 1.25 y 1.5 L/d), variando la temperatura de calentamiento de la CoD (25, 30 y 35 °C cada mes). El DASEP se alimentó de lunes a viernes con CoD a flujo constante ($Q = 1.0, 1.25$ y 1.5 L/d). La CoD se calentó a 25, 30 y 35 °C (de acuerdo con cada corrida experimental) en la cámara de combustión mencionada en el apartado anterior, con el biogás producido tras la previa alimentación.

Se realizaron 6 corridas experimentales, cada una de 5 semanas aproximadamente. El DASEP se operó como fosa séptica con sello hidráulico permanente, por ello, la válvula de biogás se mantuvo cerrada durante el proceso de alimentación. La alimentación con la CoD y el retiro de digestato se realizó de manera simultánea, una vez concluida la alimentación, se abrió la válvula de biogás para permitir su libre flujo.

6. Monitoreo del digestor anaerobio

Se recolectaron muestras del influente y efluente del DASEP diariamente de lunes a viernes siguiendo las recomendaciones de (Alcaraz-Ibarra, 2019). Los parámetros que se midieron en el influente y el efluente se presentan en la Tabla 3. Se recolectó una muestra de biogás diariamente y se determinó el contenido de CH_4 mediante la prueba de columna de absorción con NaOH (Spanjers y Vanrolleghem, 2019).

Tabla 3. Parámetros que se midieron en el influente, efluente y biogás del digestor.

Parámetro	Unidad
pH	NA
T_{amb}	°C
C_o	g-SV/L
C_e	g-ST/L
V_{Biog}	L
% CH_4	%

NA= no aplica; T= temperatura ambiente; SV= sólidos volátiles; ST= sólidos totales; V_{Biog} = volumen de biogás; %- CH_4 = porcentaje de metano.

En el caso del REM, este se calculó dividiendo la PM entre el flujo másico (FM) y se ajustó a la curva de la ecuación modificada de Gompertz. El ajuste se realizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel con la ayuda de la herramienta de análisis Solver, el cual, encuentra soluciones óptimas o cercanas a las óptimas, ajustando los datos de entrada. Al ejecutar la herramienta Solver, esta busca las combinaciones de valores que optimicen la celda objetivo respetando los condicionamientos establecidos.

7. Composición del biogás

La determinación de la composición del biogás puede hacerse mediante distintas técnicas, entre ellas, la cromatografía de gases, no obstante, existen otros métodos más simples y económicos de medición, como el mostrado en la Figura 10 (Spanjers y Vanrolleghem, 2019).

El tubo de vidrio se llena con una solución de NaOH para remover el CO₂ del biogás y así dejar el CH₄. Primero, se inyecta un volumen conocido de biogás por el extremo izquierdo, que se registra como volumen 2. El CO₂ es capturado en la solución de NaOH, de tal forma que, al finalizar la prueba, solamente queda el volumen de CH₄ (volumen 2). Posteriormente, se toma una alícuota de aire, con un volumen conocido, como en el paso anterior. El contenido de CH₄ en el biogás se calcula mediante la división del volumen desplazado por el CH₄ (volumen 2), entre el volumen desplazado por el aire (volumen 1).

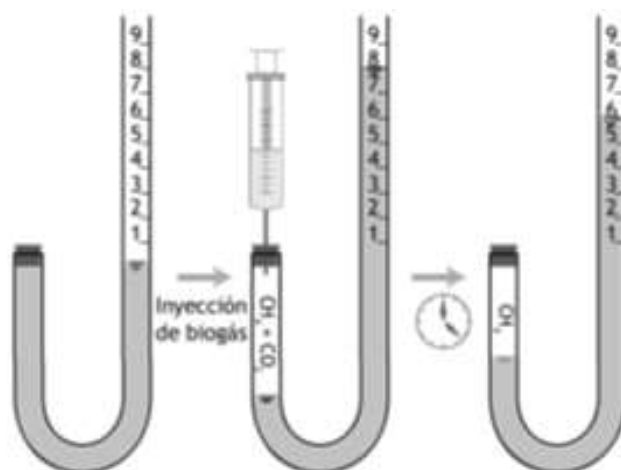


Figura 10. Prueba de columna para determinar la composición de metano en el biogás. Spanjers y Vanrolleghem (2019).

8. Fórmulas para el análisis de los datos obtenidos

❖ Flujo másico

El flujo másico corresponde a la cantidad de SV que se agregan por día al DASEP.

$$FM = C_o * Q$$

Dónde:

FM = flujo másico (g-SV/d)

C_o = concentración de sólidos volátiles en el influente (g-SV/L)

Q = flujo o caudal (L/d).

❖ Eficiencia de remoción de sólidos volátiles

La eficiencia de remoción de sólidos volátiles es el resultado de la fagocitación de la materia orgánica o los SV por medio de los microorganismos.

$$ER_{SV} = \frac{C_o - C_e}{C_o} * 100$$

Dónde:

ER_{SV} = eficiencia de remoción de sólidos volátiles (%)

C_o = concentración de sólidos volátiles en el influente (g-SV/L)

C_e = concentración de sólidos volátiles en el efluente (g-SV/L)

❖ Carga orgánica volumétrica aplicada

La carga orgánica volumétrica aplicada es la cantidad de SV que están presentes en cada litro de CoD por día.

$$COV_o = \frac{C_o}{TRH}$$

Dónde:

COV_o = carga orgánica volumétrica aplicada (g-SV/L/d)

C_o = concentración de sólidos volátiles en el influente (g-SV/L)

TRH = tiempo de retención hidráulico (d)

❖ Carga orgánica volumétrica del efluente

Es la cantidad de SV que salen del DASEP tras la alimentación, por litro CoD por día.

$$COV_{\text{efl}} = \frac{C_e * Q}{V}$$

Dónde:

COV_{efl} = carga orgánica volumétrica del efluente (g-SV/L/d)

C_e = concentración de sólidos volátiles del efluente (g-SV/L)

Q = flujo a caudal (L/d)

V = volumen del DASEP (L)

❖ Carga orgánica volumétrica removida

La carga orgánica volumétrica removida es la cantidad de SV que los microorganismos fagocitan en cada litro de CoD por día.

$$COV_{\text{rem}} = \frac{C_o - C_e}{TRH}$$

Dónde:

COV_{rem} = carga orgánica volumétrica removida (g-SV_{rem}/L/d)

C_o = concentración de sólidos volátiles en el influente (g-SV/L)

C_e = concentración de sólidos volátiles en el efluente (g-SV/L)

TRH = tiempo de retención hidráulico (d)

❖ Producción de biogás a condiciones estándar

Debido a que la PB fue medida a condiciones de operación de la ciudad de Toluca (18 - 20 ° C y 0.73 atm), ésta fue corregida a condiciones estándar (0 °C y 1 atm) para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de la literatura.

$$PB_{STD} = \frac{R_2 * P_1 * PB * T_2}{P_2 * R_1 * T_1}$$

Dónde:

PB_{STD} = PB a condiciones estándar (L-biogás/d)

$R_{1,2}$ = constante universal de los gases (0.0820857 atm*L/mol*K)

P_1 = presión atmosférica de Toluca (0.734 atm)

P_2 = presión atmosférica a condiciones estándar (1 atm)

PB = producción de biogás a condiciones de operación de la ciudad de Toluca (L-biogás/d)

T_1 = temperatura de Toluca (K)

T_2 = temperatura a condiciones estándar (273.15 K)

❖ Producción de metano a condiciones estándar

La producción de metano a condiciones estándar hace referencia al volumen de metano generado en el periodo de experimentación a condiciones estándar, criterio que se utiliza para poder comparar los resultados obtenidos con la literatura.

$$PM_{STD} = PB_{STD} * \% CH_4$$

Dónde:

$P_{CH_4ExpSTD}$: Producción experimental de metano a condiciones estándar (L- CH_4 -STD/d)

PB_{STD} = PB a condiciones estándar (L-biogás/d)

$\% CH_4$ = porcentaje de metano ($\% CH_4$)

❖ Tasa de producción de biogás y/o metano

La tasa de producción es la cantidad de biogás y/o metano que generan los microorganismos por cada litro de reactor por día.

$$TPB \text{ o } TPM = \frac{BP}{V} \text{ o } \frac{PM}{V}$$

Dónde:

TPB = tasa de producción de biogás (L-biogás/L_r/d)

TPM = tasa de producción de metano (L-CH₄/L_r/d)

PB = PB medida (L-Biogás/d)

PM = PM medido (L-CH₄/d)

V = volumen del DASEP (L).

❖ Tasa de producción de biogás y/o metano a condiciones estándar

La tasa de producción es la cantidad de biogás y/o metano que generan los microorganismos por cada litro de reactor por día, corregida a condiciones estándar (0 ° C y 1 atm) para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de la literatura.

$$TPB_{STD} \text{ o } TPM_{STD} = \frac{PB_{STD} \text{ o } PM_{STD}}{V}$$

Donde:

TPB_{STD} = tasa de producción de biogás a condiciones estándar (L-biogás/L_r/d)

TPM_{STD} = tasa de producción de metano a condiciones estándar (L-CH₄/L_r/d)

PB_{med,STD} = PB a condiciones estándar (L-Biogás/d)

PM_{med,STD} = PM a condiciones estándar (L-CH₄/d)

V = volumen del DASEP (L).

❖ Rendimiento específico de biogás y/o metano

El rendimiento específico de biogás y/o metano concierne al volumen de biogás y/o metano generado por cada kg de SV_{añadidos} al DASEP.

$$REB \text{ o } REM = \frac{PB \text{ o } PM}{Q * SV_{Inf}} = \frac{PB \text{ o } PM}{FM} = \frac{PB \text{ o } PM}{COV * V}$$

Dónde:

REB = rendimiento específico de biogás (L-biogás/kg-SV_{añadidos})

REM = rendimiento específico de metano = (L-CH₄/kg-SV_{añadidos})

PB = producción de biogás (L-biogás/d)

PDM = producción diaria de metano (L-CH₄/d)

Q = flujo o caudal (L/d)

C_o = concentración de sólidos volátiles en el influente (g-SV/L)

V = volumen del DASEP (L)

❖ Rendimiento específico de biogás a condiciones estándar

El rendimiento específico de biogás y/o metano a condiciones estándar es el volumen de biogás y/o metano generado por cada kg de SV_{añadidos} al DASEP. Se corrigió a condiciones de temperatura y presión estándar (0 °C y 1 atm) para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de la literatura.

$$REB_{med,STD} = \frac{\left(\frac{REB_{med} * P_1}{P_2}\right) * (T_2 + 0)}{(T_2 + T_1)}$$

Dónde:

REB_{med,STD} = rendimiento específico de biogás a condiciones estándar (L-biogás/kg-SV_{añadidos})

REB_{med} = rendimiento específico de biogás (L-Biogás/kg-SV_{añadidos})

P₁ = presión atmosférica de Toluca (0.734 atm)

P₂ = presión atmosférica a condiciones estándar (1 atm)

T₁ = temperatura de Toluca (K)

T₂ = temperatura a condiciones estándar (273.15 K)

❖ Rendimiento específico de metano a condiciones estándar

El rendimiento específico de metano a condiciones estándar es el volumen de metano generado por cada kg de SV_{añadidos} al DASEP. Se corrigió a condiciones de temperatura y presión estándar (0 °C y 1 atm) para poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de la literatura.

$$REM_{med,STD} = REB_{med,STD} * \% CH_4$$

Dónde:

$REM_{med,STD}$ = rendimiento específico de CH_4 a condiciones estándar (L- CH_4 /kg-SV_{añadidos})

$REB_{med,STD}$ = rendimiento específico de biogás a condiciones estándar (L-Biogás/kg-SV_{añadidos})

% CH_4 = porcentaje de metano

9. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M

Debido a que de manera habitual el %-CH₄ generado en el DASEP es de 60 % aproximadamente, se realizó la purificación de biogás con hidróxido de sodio (NaOH) 5 M, con la finalidad de obtener metano con un porcentaje mayor a 60 %.

El NaOH que se utilizó para la purificación de biogás se preparó de la siguiente manera, se pesaron 200 g-NaOH en una balanza analítica, posteriormente este se disolvió en 1 L de agua del grifo. Para realizar la purificación, se añadieron 0.8 L de NaOH 5 M en un matraz Erlen Meyer.

Se montó un sistema (Figura 11) que opera de dos maneras. La primera, que tiene como objetivo contabilizar la PB diaria generada por el microbioma presente en el DASEP. Por tanto, el biogás producido (1) pasa a través de una manguera de látex hacia un matraz liberador de presión (2) que contiene agua de grifo; el biogás ingresa al medidor RITTER (3) para ser contabilizado y se dirige hacia la cámara de aire para ser almacenado (4). En el momento en que la cámara de aire se llena, el biogás se libera hacia la atmósfera por medio del segundo matraz liberador de presión (5); cuando este modo de operación está en función, las llaves con la letra N deben permanecer abiertas y las llaves con la letra L deben estar cerradas.

El segundo modo de operación del sistema es la purificación de biogás, en el cual el biogás almacenado en la cámara de aire (6) pasa a través de una manguera de látex hacia la entrada del medidor RITTER (3), se registra la producción de biogás y este se dirige hacia el matraz (7) que contiene la solución de NaOH 5M. En dicho matraz, el biogás se difunde en el medio acuoso con la ayuda de una bomba y una piedra difusora. El CO₂ y otros gases traza son retenidos en la solución de NaOH y el CH₄ purificado pasa a un filtro que consta de un matraz vacío (8). El CH₄ se conduce hacia el matraz que contiene gel de sílice para eliminar la humedad. El proceso finaliza con la llegada del CH₄ purificado a la cámara de aire (4).

En el momento en que la cámara de aire se llena, el CH₄ se libera hacia la atmósfera por medio del matraz liberador de presión (5); cuando este modo de operación está en función, las llaves con la letra N deben permanecer cerradas y las llaves con la letra L deben estar abiertas.

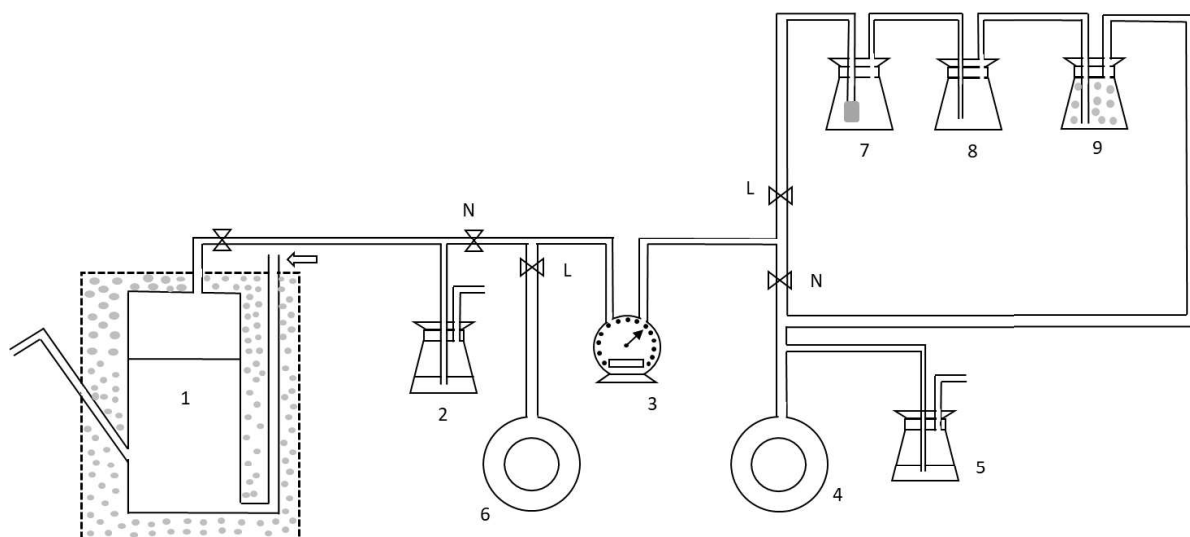


Figura 11. Diseño para la purificación de biogás. (1) Digestor anaerobio semicontinuo a escala piloto; (2) matraz liberador de presión; (3) medidor de biogás RITTER; (4) cámara de aire; (5) matraz liberador de presión; (6) cámara de aire; (7) matraz con NaOH 5M; (8) matraz filtro; (9) matraz con gel de sílice; (N) cotejo de la producción de biogás; (L) limpieza de biogás.

10. Potencial bioquímico de metano

Se llevó a cabo el ensayo de potencial bioquímico de metano (PBM) a condiciones psicrófilas, con el fin de determinar el índice de biodegradabilidad de cada sustrato y con ello, conocer el rendimiento de metano por cada SV_{añadidos}.

Para el ensayo de PBM se utilizaron cuatro frascos de vidrio color ámbar con un volumen total de 500 mL. En el primero se introdujo únicamente inóculo (proveniente del efluente de este mismo DASEP) el cual fungió como blanco experimental. Segundo, se introdujo LAPC (procedente de la laguna aireada de una PTAR que trata aguas residuales de una industria chocolatera) e inóculo. Tercero, se añadieron ROC (resultantes de cinco cocinas de hogares de Toluca, Edo, Méx.) e inóculo. Por último, en el cuarto frasco se introdujo CoD (LAPC y ROC (25 %: 75 %)) e inóculo. En este caso se analizaron sólidos volátiles y

totales (SV y ST) y pH. En la Figura 12 se aprecia el diseño de la prueba del PBM. En las botellas de vidrio (1) se añadió muestra y se cerraron con un corcho del hule (2). El punzón de la cámara de goteo de la venoclisís (3.1) se insertó en el corcho y se selló con cinta de aislar para evitar fugas de biogás. La manguera que salió de la cámara de goteo (3.2) se insertó en el medidor de biogás (5) para contabilizar el volumen producido. Finalmente, con la ayuda de una jeringa de 5 mL se tomaron alícuotas de biogás (4).

Los frascos de vidrio se rotularon como R1, R2, R3 y R4; R1 correspondió al blanco, en este caso el inóculo y el volumen añadido fue de 160 mL; al R2 se añadieron 150 mL de ROC y 50 mL de inóculo, al R3 se adicionaron 150 mL de LAPC y 50 mL de inóculo, por último, R4 150 mL de CoD y 50 mL de inóculo; la relación sustrato inóculo fue de 1:3 y se incubaron a condiciones psicrófilas durante 7 días.

Diariamente de lunes a viernes se agitó cada frasco, se cotejó la temperatura ambiente y la producción de biogás; finalmente, los datos recabados se procesaron y analizaron en una hoja de cálculo de Excel.

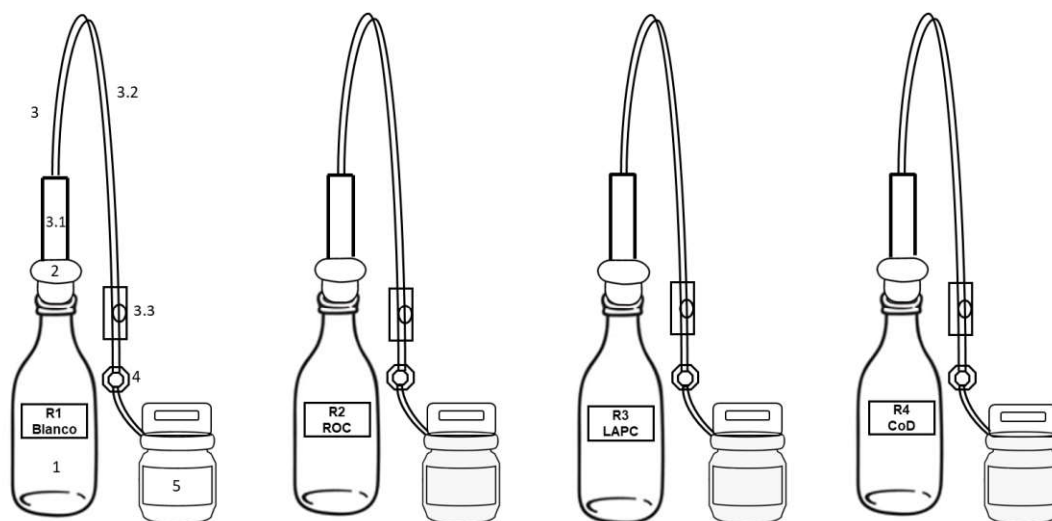


Figura 12. Boceto de los reactores para el ensayo de PBM. (1) Botella de vidrio color ámbar; (2) corcho; (3) venoclisís; (3.1) cámara de goteo con punzón; (3.2) manguera o vía; (3.3) regulador de flujo con roller; (4) sitio de inyección; (5) medidor de biogás Ritter.

Resultados y discusión

La operación del DASEP inició el 11 de noviembre del 2021, que corresponde al día 0 de monitoreo. Posteriormente, la pasante en Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables (ISES), Andrea Alpízar Miranda, inició el monitoreo para la corrida experimental de su tesis el día 61 de operación (12 de enero de 2022), concluyendo el día 245 (15 de julio del 2022).

Al finalizar la corrida experimental de la ISES Alpízar Miranda se presentó una fuga de biogás en el cuerpo del DASEP y una caída de pH. Las cuales se solucionaron, dando pie al inicio de la presente investigación, el día 263 (03 de agosto del 2022). El DASEP operó del día 263 al 523 (260 días). Sin embargo, debido a que hubo desestabilización del pH en el DASEP, hubo dos reinicios durante las corridas experimentales; el primero fue el día 293 (01 de septiembre de 2022) y el segundo en el día 346 (24 de octubre de 2022).

1. Caracterización del sustrato, inóculo y codigestión

La Tabla 4 muestra los parámetros medidos en el sustrato, el inóculo y la CoD utilizados en este estudio. El pH de la CoD (75:25) fue ácido (4.3 ± 0.4) debido a que fue preparada principalmente con restos de frutas y vegetales, los cuales tienen pH bajos (3 – 6) (Rahman, 2007).

Martí-Herrero et al. (2019) realizaron una CoD a condiciones psicrófilicas con residuos de frutas, verduras y rumen de vaca, en el cual, analizaron distintos parámetros, entre ellos, el pH, el cual fue de 5.4. Asimismo, Rajagopal et al. (2017) realizaron una CoD psicrófila con residuos de alimentos y estiércol de vaca, obteniendo un pH de 4.3, el cual fue muy cercano al presentado en esta investigación. Existen diversos trabajos en los que el pH del influente y efluente es muy similar al obtenido en la actual investigación, sin embargo, dichos estudios son a condiciones mesófilicas y termófilicas (Tabla 7), por lo cual, la actual investigación resultó ser exitosa pese a la baja temperatura de operación y bajo pH de la CoD.

La concentración de SV de la CoD (75:25 ROC-LAPC) fue de 90 ± 10 g-SV/L, la cual es similar a la reportada por otros autores como Cecchi et al. (1993), Ganesh et al. (2014), Saady y Massé (2015), Martí-Herrero et al. (2019), Kim et al. (2004) y Gomez et al. (2006). El porcentaje de SV respecto a los ST fue de 55.4, 66.4 y 91.2 % para los ROC, LAPC y CoD, respectivamente, los cuales son similares a los obtenidos por Rajagopal et al. (2017) e indican que un alto porcentaje de los ST son materia orgánica.

Tabla 4. Caracterización de los residuos orgánicos de cocina, lodos activados de purga concentrados y la codigestión.

Parámetro	Unidad	ROC 100:0	LAPC 0:100	ROC + LAPC 75:25
pH	-	4.2 ± 0.5 (3)	7.8 ± 0.1 (3)	4.3 ± 0.4 (3)
SV	g-SV/L	55.4 ± 1.4 (3)	66.4 ± 1.5 (3)	91.2 ± 0.3 (3)
ST	g-ST/L	96.8 ± 0.9 (3)	79.2 ± 1.7 (3)	101.6 ± 0.6 (3)
SV/ST	%	57.2 ± 1.3 (3)	83.8 ± 0.5 (3)	89.8 ± 0.3 (3)
H	%	-	89.93	-
NTK	mg/L	-	10.1	-

SV: sólidos volátiles; ST: sólidos totales; SV/ST: relación de sólidos volátiles respecto a totales; T: temperatura; H: humedad; NTK: nitrógeno total Kjeldahl. Los valores entre paréntesis indican el número de datos promediados.

2. Temperatura de operación del digester anaerobio semicontinuo a escala piloto

En la actual investigación, la temperatura de operación fue de 20 ± 2.0 °C, similar a la temperatura de operación utilizada por Alcaraz-Ibarra (2019) y Méndez-Yunda (2020), quienes también realizaron CoD de ROC y LAPC. En la Tabla 7, de los 33 artículos analizados, 6 tratan el tema de la DA psicrófila, no obstante, únicamente 2 corresponden a CoD de ROC y LAPC. Existe una gran cantidad de investigaciones donde se realiza CoD con RO y LAPC con rangos de temperatura operacional de 30 a 55 °C, y muy pocas investigaciones a baja temperatura. Lo cual hizo de esta una valiosa investigación, a pesar de operar a baja temperatura el rendimiento del DASEP fue similar a investigaciones descritas en la Tabla 7.

Gou et al. (2014) realizaron CoD de RO y LAP y mencionan que una temperatura óptima es indispensable en el proceso de DA y que ésta repercute en el comportamiento de los consorcios microbianos y a su vez en el rendimiento del reactor o digester.

A continuación, las corridas experimentales se llamarán C1, C2, C3, C4 C5 y C6, esto para facilitar la lectura del documento. Las condiciones de operación de cada corrida experimental se describen en la Tabla 4. La temperatura de operación del DASEP varió durante las 6 corridas experimentales (Tabla 5, 6 y Figura 13). En la C1 la temperatura de operación fue de 22.8 ± 0.4 °C. Dicha corrida inició en el día 293 (01 de septiembre de 2022), lo cual correspondió a la temporada de otoño y la temperatura ambiental máxima fue de 21 °C y la mínima de 8 °C en el valle de Toluca, Estado de México. Subsecuentemente se observa un descenso de la temperatura de operación promedio durante la C2 (19.8 ± 0.5 °C), C3 (19.3 ± 0.7 °C) y C4 (18.3 ± 0.5 °C), debido al llegada de los meses más fríos del año (noviembre, diciembre y enero) donde la temperatura ambiente tiende a disminuir.

El DASEP se aisló con fibra de vidrio, esferas de poliestireno y placas de madera para contrarrestar las bajas temperaturas de los meses más fríos del año. La temperatura de operación del DASEP tuvo un aumento de aproximadamente 2 °C por arriba de las temperaturas ambientales. En la C5 (20.3 ± 0.6 °C) y C6 (21.5 ± 1.0 °C) se aprecia un aumento paulatino de la temperatura, debido a que las corridas se realizaron en el mes de marzo (máx. 23 y mín. 4 °C) y abril (máx. 24 y mín. 5 °C), respectivamente, cuando la temperatura ambiente se incrementó. La operación del DASEP se realizó a condiciones psicrófilicas (≤ 20 °C) obteniéndose rendimientos altos de acuerdo con la literatura, los cuales se discutirán más adelante.

En la Figura 13 se muestra la temperatura ambiental mínima del día (línea azul), la temperatura ambiental promedio del día (línea naranja) y la temperatura del efluente o de operación del DASEP (línea roja). El arranque oficial del DASEP comenzó el día de operación 293, iniciando con la C1, en la cual, la temperatura de operación osciló entre 22 y 23 °C. Posteriormente, al inicio de la C2 (día de operación 343), las tres temperaturas descendieron de 21 a 16 °C, permaneciendo en el mismo rango durante las C3 y C4, no obstante, al final de la C4 se aprecia una alza de la temperatura de 16 a 20 °C. En la C5, la temperatura de operación se incrementa de 17 a 21 °C y en la C6 de 20 a 24 °C, cabe mencionar que a la mitad de la C6, se presentó un frente frío, lo cual repercutió en un desenso en la temperatura de operación de 22 a 20 °C. Durante los días más fríos de las seis

corridas (C3 y C4), la temperatura de operación del DASEP fue mayor a la temperatura ambiental promedio y temperatura ambiental mínima del día debido al aislamiento usado.

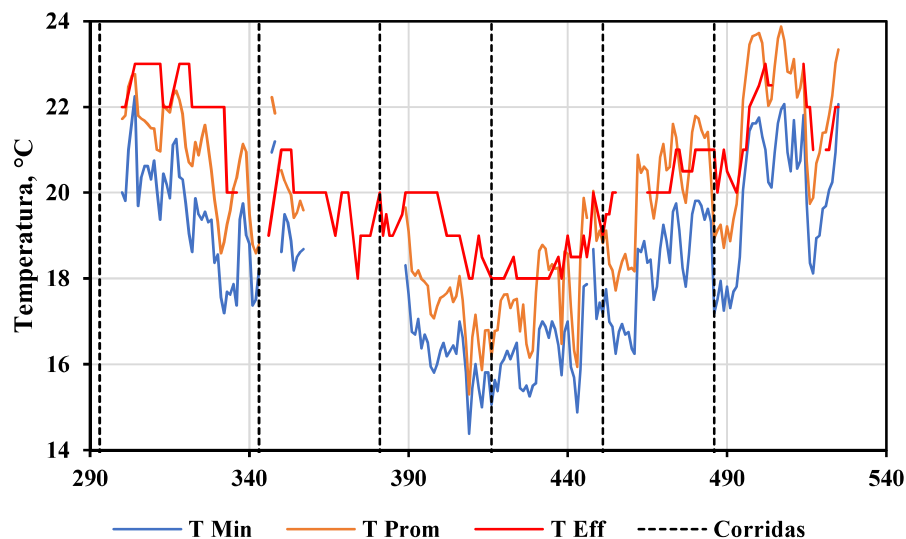


Figura 13. Relación entre la temperatura de operación del DASEP y el tiempo de operación. T Min = temperatura ambiental mínima del día; T Prom = temperatura ambiental promedio del día; T Eff = temperatura del efluente o de operación del DASEP. Líneas verticales punteadas = inicio de cada corrida experimental.

3. pH

Durante las 6 corridas experimentales, el pH del influente se mantuvo en un rango de 4.2 a 4.5 y el pH del efluente en un rango de 7.4 a 7.8 (Tabla 5 y 6). No obstante, en la Figura 14 se aprecia con más detalle la variación del pH en cada una de las corridas experimentales. Al inicio de la C2, el pH del efluente fue de 7.8 y a medida que transcurrió el tiempo de operación, el pH descendió hasta llegar a 6.3 (día de operación 343). Este descenso se debió a que el flujo de alimentación era de 1.5 L/d, lo cual aumentó la COV_o y los microorganismos presentes en el DASEP no pudieron degradar toda esa materia orgánica, ocasionando acidificación en el sistema. Por lo tanto, se optó por disminuir el flujo a 1.0 L/d, extraer el lodo anaerobio del DASEP y reinocular con lodo anaerobio activo. A raíz de estos cambios, se aprecia que el pH aumentó de 6.8 a 7.8 (día de operación 347).

En las corridas posteriores (C3, C4 y C5), el pH del efluente permaneció en el rango de 7.4 a 7.8; sin embargo, en la C6 éste disminuyó de 7.4 a 6.6 (día de operación 518), debido al

aumento del flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d y la COV_o. Con los resultados de esta corrida se confirma que un flujo igual o mayor a 1.5 L/d, repercute de manera negativa en el adecuado funcionamiento y rendimiento del DASEP, propiciado un descenso en el pH del DASEP y, por tanto, una acidificación del sistema.

Liu et al. (2008) realizaron DA de residuos orgánicos municipales (ROM) a distintos pH (6.5 - 8.5) con el fin de encontrar la mayor PM; encontraron que la mayor PM fue a un pH de 7.5, sin embargo, el pH no fue el único factor que influyó en la PM. Existen otros parámetros, como lo es la relación sustrato-inóculo, temperatura de operación y composición del sustrato, por tanto, el pH debe ser tomado en cuenta en conjunto con los demás parámetros para lograr una operación eficiente y estable del sistema.

Parra-Orobio et al. (2014) evaluaron mediante ensayos de BMP a 30 °C, la influencia del pH en la DA de ROM; sus valores de pH estuvieron en el rango de 5.5 a 8.0 y utilizaron como inóculo lodo anaerobio procedente de la digestión de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Encontraron que a un pH de 5.5 y 6.0, el REM fue de 70 y 71 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}, respectivamente, mientras que, a pH cercanos a la neutralidad, el REM fue de 126 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. El pH debe monitorearse de manera constante, debido a que un cambio en él puede estar indicando acidificación en el DASEP; es recomendable que su valor se mantenga siempre en un rango neutro.

En la presente investigación, el pH se mantuvo en valores cercanos a la neutralidad, y como se mencionó anteriormente, si el pH baja a valores de entre 4 y 6, indican acidificación en el sistema, por ello, diariamente se monitoreó este parámetro.

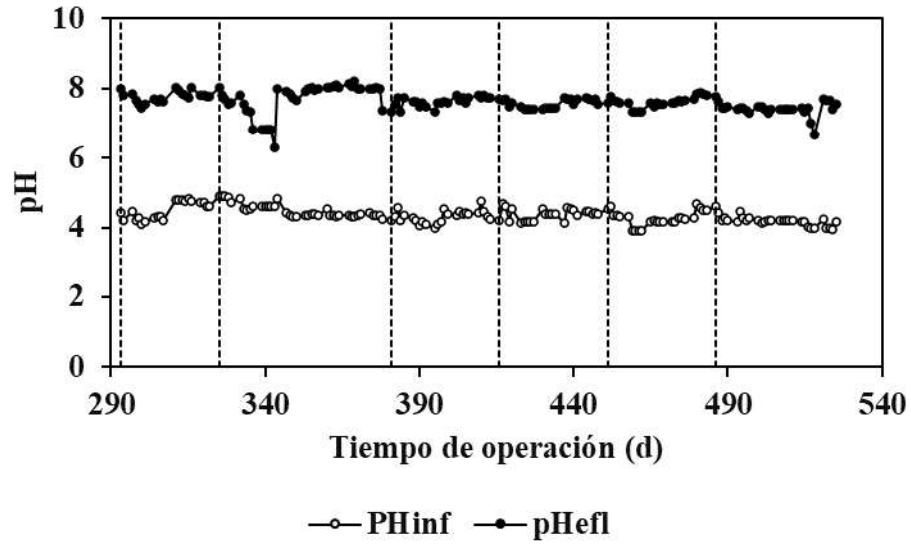


Figura 14. Relación del pH del influente y efluente respecto a los días de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

A continuación, en las Tablas 5 y 6 se muestran los parámetros operacionales y los resultados de cada una de las 6 corridas experimentales, en las cuales, la temperatura de calentamiento de la CoD y el flujo del influente fueron las variables que se modificaron corrida tras corrida.

Tabla 5. Parámetros operacionales de las corridas experimentales 1, 2 y 3.

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
Tiempo de operación	d	293-324 31	343-380 37	381-415 34
Q	L/d		1	
T _{DASEP}	°C	22.8 ± 0.4 (21)	19.8 ± 0.5 (25)	19.3 ± 0.7 (25)
pH _{inf}		4.5 ± 0.3 (21)	4.4 ± 0.1 (25)	4.3 ± 0.2 (25)
pH _{efl}		7.8 ± 0.2 (21)	7.9 ± 0.4 (25)	7.6 ± 0.1 (25)
TRH	d		70	
C _o	g-SV _o /L	109.1 ± 10.4 (9)	91.4 ± 9.2 (9)	94.3 ± 9 (17)
C _e	g-SV _e /L	20.3 ± 2.3 (9)	30.2 ± 1.6 (9)	31.3 ± 1.5 (17)
SV _{rem}	%	81.3 ± 2 (9)	66.8 ± 3.7 (9)	62.1 ± 11.9 (17)
COV _o	g-SV _o /L/d	1.6 ± 0.1 (9)	1.3 ± 0.1 (9)	1.4 ± 0.1 (17)
COV _{rem}	g-SV _{rem} /L/d	1.3 ± 0.1 (9)	0.9 ± 0.1 (9)	0.9 ± 0.1 (17)
CH ₄	%	60.9 ± 2.2 (9)	63.2 ± 2.3 (9)	62.3 ± 1.8 (17)
PB _{STD}	L-biogás/d	63.7 ± 12.4 (9)	57.5 ± 10.4 (9)	55.9 ± 9.5 (17)
PM _{STD}	L-CH ₄ /d	38.8 ± 7.5 (9)	36.3 ± 6.4 (9)	34.8 ± 5.4 (17)
TPB _{STD}	L-biogás/L _r /d	0.9 ± 0.2 (9)	0.8 ± 0.2 (9)	0.8 ± 0.1 (17)
TPM _{STD}	L- CH ₄ /L _r /d	0.5 ± 0.1 (9)	0.5 ± 0.09 (9)	0.5 ± 0.08 (17)
REB _{STD}	L-biogás/kg-SV _{añadidos}	581.2 ± 99.2 (9)	630.7 ± 103.8 (9)	594.5 ± 89.6 (17)
REM _{STD}	L-CH ₄ /kg-SV _{añadidos}	353.8 ± 59.5 (9)	399.1 ± 70.6 (9)	369.9 ± 52.9 (17)

Q= flujo o caudal (L/d); T_{DASEP}= temperatura de operación (° C); pH_{inf}= pH influente; pH_{efl}= pH effluente; TRH= tiempo de retención hidráulico; C_o= sólidos volátiles del influente (g-SV_o/L); C_e= sólidos volátiles del efluente (g-SV_e/L); SV_{rem}= porcentaje de sólidos volátiles removidos (%); COV_o= carga orgánica volumétrica aplicada; COV_{rem}= carga orgánica volumétrica removida; CH₄= porcentaje de metano (%); PB_{STD}= producción de biogás a condiciones estándar (L-biogás/d); PM_{STD}= producción de metano a condiciones estándar (L-CH₄/d); TPB_{STD}= tasa de producción de biogás a condiciones estándar (L-biogás/L_r/d); TPM_{STD}= tasa de producción de metano a condiciones estándar (L- CH₄/L_r/d); REB_{STD}= rendimiento específico de biogás a condiciones estándar (L-biogás/kg-SV_{añadidos}); REM_{STD}= rendimiento específico de metano a condiciones estándar (L- CH₄/kg-SV_{añadidos}).

Tabla 6. Parámetros operacionales de las corridas experimentales 4, 5 y 6.

Parámetro	Unidad	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6
Tiempo de operación	d	416-450	451-485	486-523
Q	L/d	34	34	37
T _{DASEP}	°C	18.3 ± 0.5 (25)	20.3 ± 0.6 (25)	21.5 ± 1.0 (19)
pH _{inf}		4.4 ± 0.2 (25)	4.3 ± 0.2 (25)	4.2 ± 0.1 (19)
pH _{efl}		7.6 ± 0.3 (25)	7.6 ± 0.1 (25)	7.4 ± 0.1 (19)
TRH	d	56	56	47
C _o	g-SV _o /L	87.6 ± 6 (15)	91.2 ± 5.6 (13)	83.9 ± 5.9 (9)
C _e	g-SV _e /L	33.2 ± 1.3 (15)	32.9 ± 1.8 (13)	34.2 ± 1.8 (9)
SV _{rem}	%	61.9 ± 2.5 (15)	63.8 ± 3.5 (13)	59.1 ± 2.0 (9)
COV _o	g-SV _o /L/d	1.6 ± 0.1 (15)	1.3 ± 0.1 (13)	1.8 ± 0.3 (9)
COV _{rem}	g-SV _{rem} /L/d	1.0 ± 0.1 (15)	1.0 ± 0.1 (13)	0.7 ± 0.1 (9)
CH ₄	%	60.8 ± 0.5 (15)	60.8 ± 1.5 (13)	60.9 ± 4.5 (9)
PB _{STD}	L-biogás/d	62.4 ± 11.0 (15)	71.1 ± 26.2 (13)	128.1 ± 44.3 (9)
PM _{STD}	L-CH ₄ /d	37.9 ± 6.7 (15)	43.1 ± 15.5 (13)	77.1 ± 25.7 (9)
TPB _{STD}	L-biogás/L _r /d	0.9 ± 0.2 (15)	1.0 ± 0.4 (13)	1.8 ± 0.6 (9)
TPM _{STD}	L- CH ₄ /L _r /d	0.4 ± 0.1 (15)	0.6 ± 0.2 (13)	1.1 ± 0.4 (9)
REB _{STD}	L-biogás/kg-SV _{añadidos}	571.7 ± 105.2 (15)	626.8 ± 238.1 (13)	721.2 ± 163.8 (9)
REM _{STD}	L-CH ₄ /kg-SV _{añadidos}	347.4 ± 63.9 (15)	380.0 ± 140.6 (13)	424.8 ± 89.6 (9)

Q= flujo o caudal (L/d); T_{DASEP}= temperatura de operación (° C); pH_{inf}= pH influente; pH_{efl}= pH efluente; TRH= tiempo de retención hidráulico; C_o= sólidos volátiles del influente (g-SV_o/L); C_e= sólidos volátiles del efluente (g-SV_e/L); SV_{rem}= porcentaje de sólidos volátiles removidos (%); COV_o= carga orgánica volumétrica aplicada; COV_{rem}= carga orgánica volumétrica removida; CH₄= porcentaje de metano (%); PB_{STD}= producción de biogás a condiciones estándar (L-biogás/d); PM_{STD}= producción de metano a condiciones estándar (L-CH₄/d); TPB_{STD}= tasa de producción de biogás a condiciones estándar (L-biogás/L_r/d); TPM_{STD}= tasa de producción de metano a condiciones estándar (L-CH₄/L_r/d); REB_{STD}= rendimiento específico de biogás a condiciones estándar (L-biogás/kg-SV_{añadidos}); REM_{STD}= rendimiento específico de metano a condiciones estándar (L- CH₄/kg-SV_{añadidos}).

4. Tiempo de retención hidráulico

El DASEP operó con 3 TRH. Durante las C1, C2 y C3, el TRH fue de 70 días, mientras que en la C4 y C5 fue de 56 días y en la C6 fue de 47 días. Inicialmente en la C2, el TRH fue de 47 días con un flujo de 1.5 L/d y una COV_o de 2.2 g-SV/L/d. Dichos parámetros de operación ocasionaron una acidificación en el DASEP, por ello, se optó por reiniciar la C2, inoculando lodo anaerobio nuevo y operando el DASEP con un TRH de 70 días, un flujo de 1 L/d y COV_o de 1.3 g-SV/L/d. Fue así como el DASEP se estabilizó y dio pauta a la realización de las siguientes corridas; sin embargo, en la C6 se volvió a operar con un TRH

de 47 días, un flujo de 1.5 L/d y una COV_o de 1.8 g-SV/L/d. Los parámetros operacionales antes mencionados indujeron nuevamente un descenso en el pH, con ello, se corroboró que el DASEP no puede operar a TRH igual o menor a 47 días, a flujo mayor de 1.5 L/d y COV_o mayor a 1.8 g-SV/L/d.

Campaña et al. (2011) evaluaron distintos TRH en la digestión de lodos residuales a una temperatura de 20 a 25 °C, COV_o de 0.14 g-SV/L/d y encontraron que el TRH más favorable a esos rangos de temperatura de operación fue de 50 días. Con el TRH de 50 días el rendimiento de su reactor fue mayor y más exitoso, obteniendo un REM de 85 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}. En la actual investigación, los TRH que se manejaron fueron de 47, 56 y 70 días, mayores a los de Campaña et al. (2011), no obstante, los REM de esta investigación fueron mayores, los cuales se comentarán más adelante.

Alcaraz-Ibarra (2019) realizó CoD de ROC (receta sintética) y LAPC a condiciones psicrófilas con TRH de 40 a 120 días y COV_o de 0.5 a 1.7 g-SV/L/d. Concluyó que el TRH óptimo es de 60 días y que un TRH de 40 días es insuficiente para garantizar a largo plazo un buen rendimiento de su digestor de 10 L. En el actual trabajo el TRH de 47 días fue insuficiente para garantizar un adecuado rendimiento del DASEP de 70 L.

5. Sólidos volátiles del influente, efluente y porcentaje de remoción

En la Figura 15 se aprecia que, al inicio de la C1, la C_o fue cercana a 120 g-SV/L, posteriormente, en las demás corridas, este valor disminuyó y se mantuvo en el rango de 80 a 90 g-SV/L. En la C1 se empleó la misma proporción de la investigación anterior realizada por la IES Andrea Alpízar para la preparación de la CoD (85:15 ROC-LAPC). Por tanto, para obtener una disminución en el C_o , se optó por ajustar la proporción de la receta a 75:25 ROC-LAPC.

En cuanto a la C_e , en la C1 fue de 20 g-SV/L, y a partir de la C2 estos valores incrementaron a 30 g-SV/L y continuaron así hasta la C6. Este incremento se debió a que tras la acidificación del DASEP en la C2, se reinoculó el reactor con lodo anaerobio activo, repercutiendo en el incremento de la concentración de lodo anaerobio dentro del DASEP.

La ER_{SV} en la C1 fue de 80 %, sin embargo, en las 5 corridas posteriores, el porcentaje disminuyó en el rango de 60 y 70 %. Durante la etapa experimental C2 se observó que la disminución de este parámetro se debió a que en la C1 el DASEP se reinóculo con lodo anaerobio activo con una concentración de SSV mayor a la del DASEP, los microorganismos necesitan cierto tiempo para volver a adaptarse al medio y lograr así la ER_{SV} que se tenía hasta antes de la reinoculación.

Heo et al. (2006) realizaron CoD con RO y LAP obtenidos del sedimentador secundario de una PTAR municipal, operaron un reactor de 3.5 L a 35 °C, TRH de 13 días, COV_o de 1.8 a 4.3 kg-VS/m³/d, obteniendo ER_{SV} de 36.2 a 67.4 %. A pesar de operar a condiciones mesofílicas, y COV_o medias (Tabla 7), la ER_{SV} fue menor a la obtenida en esta investigación, considerándose así el DASEP como una opción viable para el tratamiento de ROC y LAPC a baja temperatura.

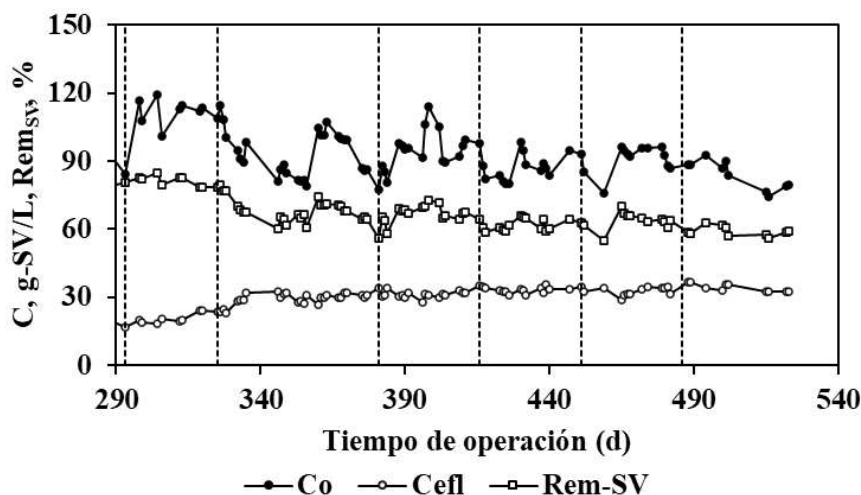


Figura 15. Relación entre la concentración inicial, final, y porcentaje de remoción de sólidos volátiles, respecto a los días de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

Gou et al. (2014) realizaron CoD con RO provenientes de un comedor universitario y LAP obtenido del sedimentador secundario de una PTAR municipal. Operaron con tres temperaturas (35, 45 y 55 °C) y TRH de 4.2 a 33.3 días. La C_o en todas sus corridas experimentales fue de 33 g-SV/L y las COV_o variaron de 1 a 8 g-SV/L/d. La ER_{SV} a 35 °C fue de 61 a 0 %; mientras que, a 45 °C, la ER_{SV} fue de 65 a 0 %; y a 55 °C, la ER_{SV} fue de

78 a 38 %. La ER_{SV} de la actual investigación fue similar a la que obtuvo Gou et al. (2014) a temperaturas mesofílicas y termofílicas y COV_o menores a 4 g-SV/L/d.

Méndez-Yunda (2020) realizó CoD con una receta sintética de ROC y LAPC a condiciones psicofílicas, COV_o de 0.4 a 1.9 g-SV/L/d y obtuvo ER_{SV} de 58.9 a 74.4 %. Las COV_o , la temperatura de operación y las ER_{SV} obtenidas por Méndez-Yunda (2020) y las obtenidas por el presente trabajo son similares.

Se aprecia que la ER_{SV} de esta investigación es similar a los valores obtenidos en investigaciones con DA a condiciones mesofílicas y termofílicas (Tabla 7), por lo que se puede concluir que no fue necesaria la aplicación de energía para el calentamiento del DASEP. Aun así, la obtención de ER_{SV} similares fue debido a que los microorganismos presentes en el DASEP ya están adaptados a ambientes de baja temperatura, lo cual trae consigo un ahorro económico y energético en el proceso de tratamiento de ROC y LAPC.

6. Carga orgánica volumétrica aplicada y removida

En la Figura 16 se muestra el comportamiento de la COV_o y COV_{rem} durante las 6 corridas experimentales. Las COV_o estuvieron en el rango de 1.3 a 1.8 g-SV/L/d, mientras que las COV_{rem} estuvieron en el rango de 0.7 a 1.3 g-SV/L/d. Al inicio de la C2, el flujo aumentó a 1.5 L/d, lo cual repercutió en un incremento de la COV_o de 1.6 a 2.3 g-SV/L/d, un valor alto en comparación con las COV_o que se manejaron anteriormente en la C1. Este valor alto repercutió de manera negativa en el adecuado funcionamiento del DASEP, ocasionando un descenso en el pH y acidificación de este. Como solución, en la C2 se optó por disminuir el flujo de 1.5 a 1.0 L/d, reducir la cantidad de SV de la CoD para mantenerlos en un rango de 80 a 90 g-SV/L. A raíz de estos cambios, se aprecia una disminución en la COV_o y COV_{rem} (Figura 16). Dichos valores se mantuvieron durante las siguientes corridas.

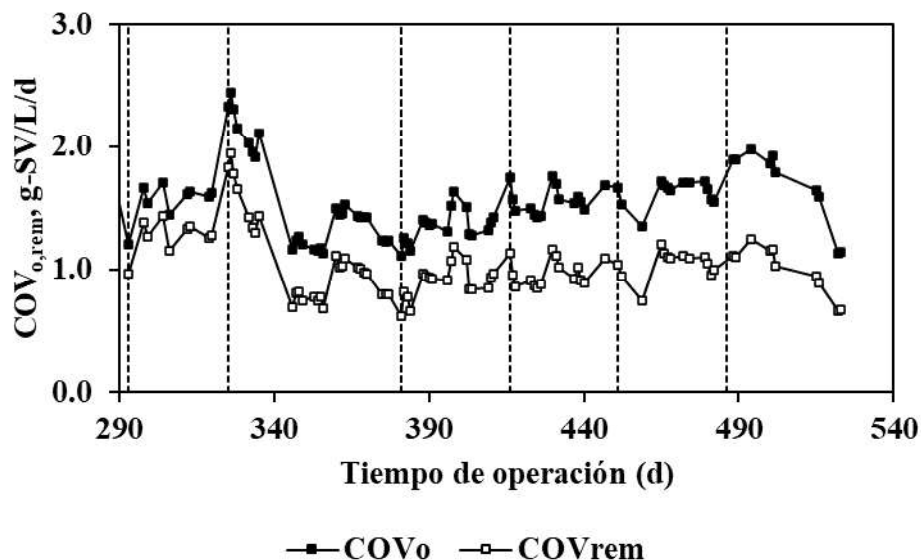


Figura 16. Relación entre la COV aplicada y removida, respecto al tiempo de operación. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

Martí-Herrero et al. (2019) realizaron CoD de RO y rumen de vaca a condiciones de operación psicofílica, TRH de 87 a 162 días, COV_0 de 0.6 a 1.1 g-SV/L/d, obtenido COV_{rem} de 0.5 a 1.0 g-SV/L/d. Pese a que manejaron COV_0 ligeramente bajas y TRH más prolongados, las COV_{rem} son ligeramente menores a las obtenidas en esta investigación.

Alcaraz-Ibarra (2019) realizó CoD de ROC (receta sintética) y LAPC a 20 °C, operó con TRH de 40 a 120; COV_0 de 0.5 a 1.7 g-SV₀/L/d y la COV_{rem} fue de 0.35 a 1.05 g-SV_{rem}/L/d. Se observa que a medida que la COV_0 disminuye, la COV_{rem} también, de manera directamente proporcional. En la presente investigación se observa el mismo comportamiento tanto para la COV_0 como para la COV_{rem} , para cada una de las corridas experimentales.

Las COV_0 que se utilizaron en la actual investigación están dentro del rango de COV_0 utilizadas en investigaciones a condiciones psicofílicas. Las COV_0 utilizadas en investigaciones a temperaturas mesofílicas y termofílicas varían de 0.5 a 10.5 g-SV/L/d; las COV_0 de la presente investigación están dentro del rango bajo (1.4 – 1.8 g-SV/L/d), sin embargo, los REM fueron iguales y en algunos casos mayores a lo reportado en la literatura (Tabla 7).

Debido a que la COV_{rem} variaba de manera directamente proporcional a la COV_o , se realizó la correlación lineal de ambas (Figura 17). El coeficiente de determinación R^2 fue de 0.814, lo que indica una alta correlación entre ambas variables. La pendiente de la regresión lineal indica que por cada 1.0 g-SV/L/d aplicado, se remueve 0.7991 g-SV/L/d, esto quiere decir que la eficiencia de remoción de las COV es de 79.91 %.

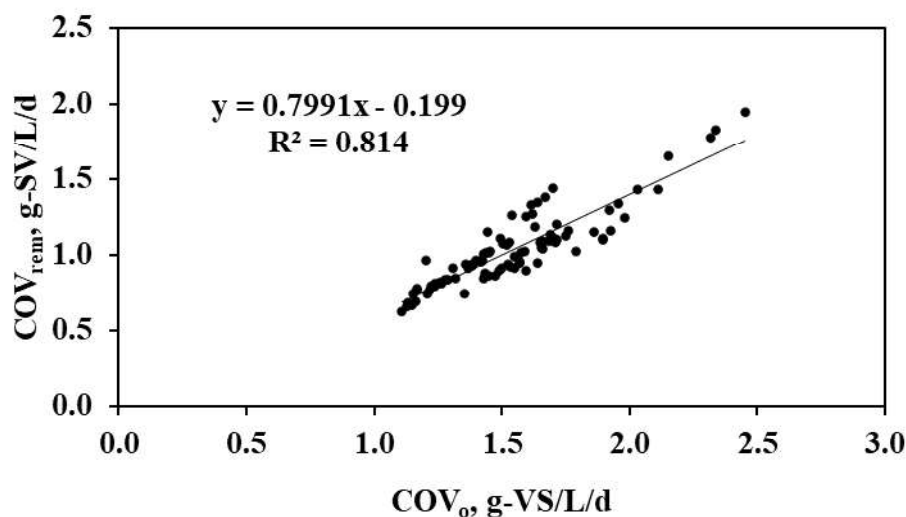


Figura 17. Correlación entre la carga orgánica volumétrica removida y la carga orgánica volumétrica aplicada.

7. Producción de biogás y porcentaje de metano

En la Tabla 5 y 6 se aprecia la PB, la cual estuvo en un rango de 55 a 128 L/d, durante las etapas experimentales. Dicha PB varió en función del flujo de alimentación, de la COV_o , de la temperatura de calentamiento de la CoD y de la temperatura de operación.

Las C1, C2 y C3 operaron con una temperatura de calentamiento de la CoD de 25, 30 y 35 °C y una temperatura de operación de 22.8, 19.8 y 19.3 °C respectivamente. En los tres casos, el flujo de alimentación fue de 1.0 L/d. La PB obtenida con cada una de las condiciones antes mencionadas fue de 63.7, 57.5 y 55.9 L/d respectivamente. Se aprecia una disminución en la PB, a medida que la temperatura de operación disminuye y la temperatura de calentamiento de la CoD aumenta.

Las C4 y C5 operaron con una temperatura de calentamiento de la CoD de 25 y 30 °C, una temperatura de operación de 18.3 y 20.3 °C, respectivamente. En ambas corridas experimentales, el flujo de alimentación fue de 1.25 L/d. La PB obtenida con dichos parámetros operacionales fue de 62.4 y 71.1 L/d, respectivamente. El incremento en la PB se debió al incremento del flujo de alimentación de 1.0 a 1.25 L/d y a que la temperatura de operación también incrementó.

La C6 operó con una temperatura de calentamiento de la CoD de 25 °C y una temperatura de operación de 21.5 °C. El flujo de alimentación fue de 1.5 L/d. La PB obtenida fue de 128.1 L/d. El incremento en la PB se debió al incremento del flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d y a que la temperatura de operación incrementó de 20.3 a 21.5 °C.

En la Figura 18 se aprecia el comportamiento de la PB de lunes a domingo (días de operación 318 a 325). La CoD se preparó los lunes para alimentar el DASEP de lunes a viernes. El día de operación 318 concierne a un lunes, se aprecia que en ese día la PB es baja, debido a que el DASEP no se alimentó durante el fin de semana, por tanto, los microorganismos necesitan tiempo suficiente para poder adaptarse al nuevo sustrato presente en la CoD y así empezar a degradarlo para comenzar a producir el biogás. En los días posteriores (martes a viernes) se aprecia como la PB va aumentando día con día, esto debido a que conforme el DASEP es alimentado con el mismo lote de CoD, los microorganismos lo reconocen y lo digieren más fácilmente. Los viernes el DASEP se alimentó doble, esto para que los microorganismos tuvieran sustrato suficiente para el fin de semana.

En la Figura 18 se observa un pico en la PB que se presenta aproximadamente cuatro horas después de cada alimentación debido a que los microorganismos degradan primero la materia orgánica fácilmente biodegradable, posteriormente, continúan con la materia orgánica difícilmente biodegradable y la PB desciende. Este pico se presenta diariamente después de cada alimentación.

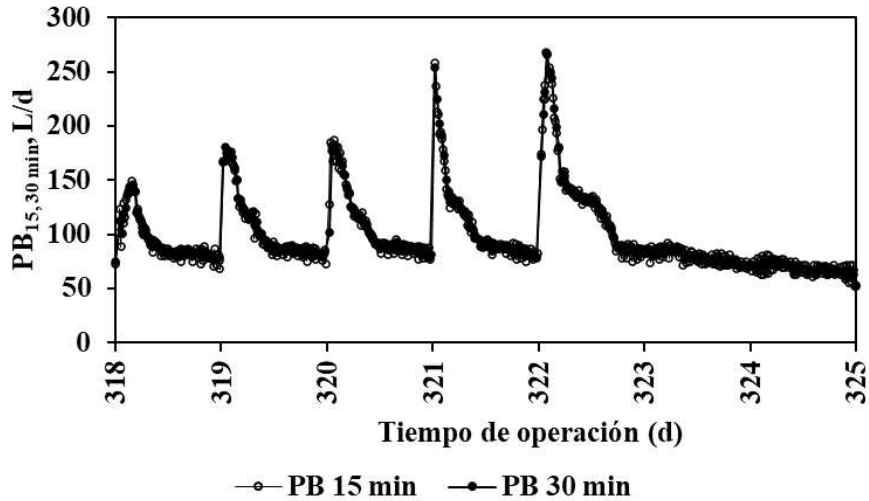


Figura 18. Producción de biogás, cada 15 y 30 minutos.

En la Tabla 5 y 6 se aprecia la variación entre la producción y el porcentaje de CH_4 durante las 6 corridas. La PM estuvo en el rango de 34.8 a 77.1 L/d y el %- CH_4 de 60.8 a 63.2 %. En la Figura 19 se aprecia que tanto la PB como la PM se comportaron de manera directamente proporcional, con base en las variaciones del flujo de alimentación, de la temperatura de calentamiento de la CoD y de la temperatura de operación, antes mencionados.

En la C2, el %- CH_4 disminuyó de 62 a 54 % (día de operación 333), a causa del aumento en el flujo de alimentación de 1.0 a 1.5 L/d, un incremento de la COV_o de 1.6 a 2.3 g-SV/L/d, y al descenso de la temperatura de operación de 22.8 a 19.8 °C. A manera de solución se optó por reinocular el DASEP con lodo anaerobio nuevo, disminuir el flujo de alimentación de 1.5 a 1.0 L/d y la COV_o de 2.3 a 1.3 g-SV/L/d. Con la modificación de dichos parámetros, en las corridas siguientes el %- CH_4 se mantuvo en el rango de 60.8 a 63.2 %.

Al inicio de la C6 el %- CH_4 disminuyó de 60 a 55 %, debido al incremento del flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d y a las COV_o de 1.5 a 2.0 g-SV/L/d. Por ello, en el día de operación 515 se optó por agregar bicarbonato de sodio al DASEP, dejar de alimentar durante una semana y disminuir el flujo de 1.5 a 1.0 L/d. En el día de operación 522, el %-

CH₄ incrementó de 56 a 70 %, debido a la adición del bicarbonato y a la semana que estuvo sin alimentación.

Existe poca literatura respecto a CoD de ROC y LAPC a baja temperatura, sin embargo, uno de los escasos trabajos que aborda parámetros similares es el de Rajagopal et al. (2017). Donde realizaron CoD de residuos de alimentos y estiércol de vaca, a condiciones psicrófilas con un reactor de 24 L, TRH de 161 a 181 días, COV_o de 0.8 a 4.2 g-SV/L/d. El %-CH₄ que obtuvieron fue de 60 a 69 %. El %-CH₄ de la actual investigación está dentro de los valores obtenidos por Rajagopal et al. (2017), no obstante, los TRH que ellos manejaron son más prolongados que los de la actual investigación.

Martí-Herrero et al. (2019) realizaron CoD de RO y rumen de vaca, con temperaturas de operación de 14 a 18 °C. El %-CH₄ que obtuvieron fue de 41 a 44 %, menor que el de la actual investigación, esto se debe a que las COV_o que utilizaron fueron bajas, las cuales van de 0.6 a 1.1 g-SV/L/d.

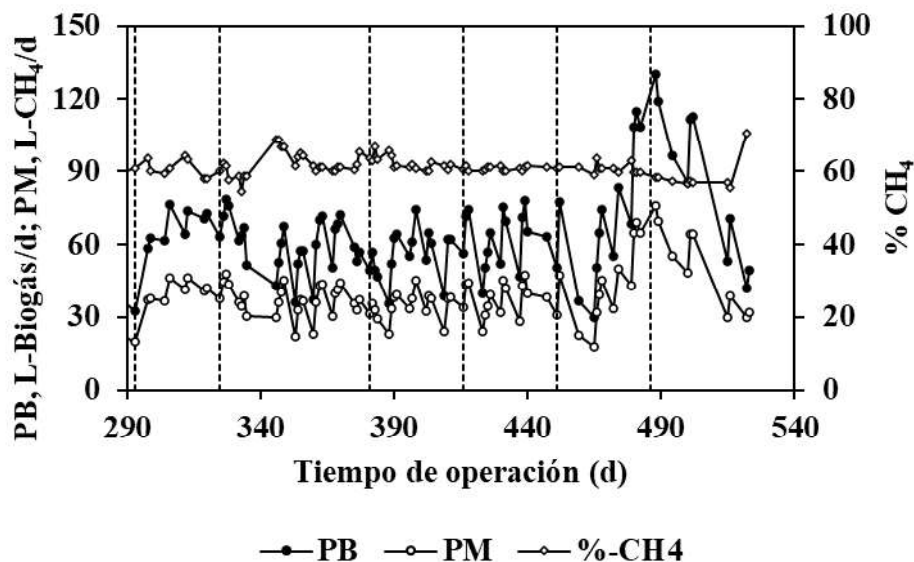


Figura 19. Relación entre la producción de biogás, producción y porcentaje de metano. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

Tabla 7. Trabajos de digestión anaerobia psicrófila, mesófila y termófila.

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	TRH (d)	COV. (g-SV/L/d)	PB (L-Biogás/d)	CH ₄ (%)	PM (L-CH ₄ /d)	TPB (L- Biogás/L _{react} /d)	TPM (L- CH ₄ /L _{react} /d)	REB (L-Biogás/kg- SV _{anádidos})	REM (L-CH ₄ /kg- SV _{anádidos})
Martí-Herrero et al. (2019)	RO y rumen de vaca	18	10,950	102	0.9	2,628.0	42	1,094.8	0.24	0.10	288	120
		17		87	1.1	2,956.5	44	1,314.2	0.27	0.12	248	110
		14		96	1.0	2,847.0	42	1,204.6	0.26	0.11	284	120
Rajagopal et al. (2017)	RO y estiércol de vaca	17	24	162	0.6	2,080.5	42	876.3	0.19	0.08	356	150
				172	0.8	19.2	62	12.0	0.80	0.50	960	600
				172	1.2	38.4	60	19.2	1.60	0.80	1400	700
Cecchi et al. (1993)	RO		2,999	172	1.4	28.6	65	18.5	1.19	0.77	726	470
				181	1.8	30.7	66	20.4	1.28	0.85	675	448
				161	1.9	31.2	67	20.4	1.30	0.85	581	380
Martín-González et al. (2010)	RO + residuos de grasa de una PTAR		5	172	2.2	31.2	68	21.6	1.30	0.90	650	450
				172	2.9	48.2	69	31.7	2.01	1.32	640	420
				172	4.2	68.4	67	45.8	2.85	1.91	612	410
Ganesh et al. (2014)	RO + lodo activado de purga	36	15	15	7.5	4,300.0	52	2,236.0	1.40	0.75	200	99
		55		13	7.1	5,000.0	55	2,770.0	1.70	0.92	240	130
		55		14	6.0	7,500.0	61	4,597.5	2.50	1.59	420	264
Rogel-Dorantes (2017)	LAPC		11	16	4.0	7.9	62	4.9	1.58	0.98	380	240
				15	4.5	13.6	63	8.6	2.72	1.71	550	350
				80	2.0	15.4	56	8.6	1.03	0.57	806	450
Alcaraz-Ibarra (2019)	ROC (receta sintética) + LAPC	35	15	45	3.5	30.6	57	17.4	2.04	1.16	827	470
				40	0.3	0.4	82	0.4	0.4	220	145	
				30	0.3	0.6	82	0.5	0.5	199	199	
Méndez-Yunda (2020)	ROC (receta sintética) + LAPC		11	40	1.7	5.7	65	3.7	3.7	309	309	
				60	1.1	4.4	66	2.9	2.9	383	253	
				80	0.8	3.4	66	2.2	2.2	380	250	
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		3	100	0.7	2.7	67	1.8	1.8	379	252	
				120	0.5	2.3	67	1.6	1.6	400	271	
				40	1.7	1.3	65	0.8	0.8	68	50	
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga	20	11	60	1.1	2.4	66	1.6	1.6	200	130	
				80	0.8	2.2	66	1.4	1.4	240	160	
				100	0.7	1.7	67	1.2	1.2	243	160	
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		3	120	0.5	1.4	67	1.0	1.0	240	160	
				40	1.7	4.2	72	3.0	3.0	230	158	
				60	1.1	4.1	72	2.9	2.9	340	247	
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		11	80	0.9	3.2	72	2.3	2.3	350	250	
				100	0.7	2.8	72	2.0	2.0	380	280	
				120	0.6	2.2	72	1.6	1.6	380	270	
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		11	120	0.6	2.2	72	1.6	1.6	380	270	
				1.9	9.1	64	5.9	5.9	460	290		
				1.5	6.3	65	4.1	4.1	390	250		
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga	20	11	60	1.1	5.2	68	3.5	3.5	430	290	
				0.8	3.0	68	2.0	2.0	360	250		
				0.4	1.7	72	1.2	1.2	410	300		
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		3	1.0	1.0	1.5	34	0.5	0.50	560	270	
				1.5	3.0	43	1.3	1.3	625	360		
				1.8	3.8	47	1.8	1.8	660	370		
Liu et al. (2018)	RO + lodo activado de purga		3	2.0	2.0	4.5	53	2.4	2.4	690	390	
				2.3	5.1	58	3.0	3.0	770	450		
				2.5	6.0	63	3.8	3.8	750	400		

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	TRH (d)	COV _o (g-SV/L/d)	PB (L-Biogás/d)	CH ₄ (%)	PM (L-CH ₄ /d)	TPB (L-Biogás/L _{react} /d)	TPM (L-CH ₄ /L _{react} /d)	REB (L-Biogás/kg-SV _{anádidos})	REM (L-CH ₄ /kg-SV _{anádidos})		
Álvarez y Lidén (2008)	Estercol de llama, vaca y oveja	11--25			1.0	1.5	48	0.7	0.50	0.24	620	370		
		15--29			1.5	2.7	52	1.4	0.90	0.47	640	360		
		19--32			1.8	3.7	54	2.0	1.23	0.67	670	350		
		18	9.3	30	2.0	4.0	57	2.3	1.33	0.76	690	360		
		25			18	2.3	4.6	59	2.7	1.53	0.90	770	350	
		35			16	2.5	5.7	61	3.5	1.90	1.16	460	240	
							2.2	56	1.2	0.20	0.13	120	69	
							2.7	55	1.5	0.30	0.16	147	84	
							2.0	56	1.6	0.30	0.17	155	89	
							1.5	61	0.9	0.20	0.10	79	48	
Blanco et al. (2010)	Estercol de oveja y residuos de papa (3:1)	35	3	90	0.9	0.9	58	0.5	0.30	0.18	560	323		
					1.0	0.9	63	0.6	0.31	0.20	525	329		
					2.1	4.2	49	2.1	0.50	0.22	215	109		
					0.8	0.5	55	0.2	0.15	0.08	332	184		
					0.9	0.9	58	0.5	0.30	0.18	560	323		
					1.0	0.9	63	0.6	0.31	0.20	525	329		
					0.3	0.3	-	-	-	0.36	0.27	252	186	
					627.2	627.2	52	326.8	1.96	1.02	782	408		
					3.9	100	2.2	3.9	1.6	0.39	0.16	180	70	
					10.7	60	3.6	10.7	6.4	1.07	0.64	300	180	
Cabbai et al. (2015)	RO + lodo de purga	36	1,800	24	0.9	860.0	71	610.0	0.48	0.34	440	320		
					1.2	840.0	74	620.0	0.47	0.34	440	320		
					0.7	0.3	-	-	-	0.36	0.27	252	186	
					30	30	0.4	627.2	52	326.8	1.96	1.02	782	408
					2.2	100	2.2	3.9	1.6	0.39	0.16	180	70	
					3.6	60	3.6	10.7	6.4	1.07	0.64	300	180	
					7.2	30	7.2	31.6	18.3	3.16	1.83	440	250	
					8.6	25	8.6	45.7	27.9	4.57	2.79	530	320	
					2.2	100	2.2	3.7	1.5	0.37	0.15	170	70	
					3.6	60	3.6	8.2	3.7	0.82	0.37	230	140	
Da Cunha et al. (2021)	RO + lodo de purga	30	1	30	0.4	627.2	52	326.8	1.96	1.02	782	408		
					2.2	100	2.2	3.9	1.6	0.39	0.16	180	70	
					3.6	60	3.6	10.7	6.4	1.07	0.64	300	180	
					7.2	30	7.2	31.6	18.3	3.16	1.83	440	250	
					8.6	25	8.6	45.7	27.9	4.57	2.79	530	320	
					2.2	100	2.2	3.7	1.5	0.37	0.15	170	70	
					3.6	60	3.6	8.2	3.7	0.82	0.37	230	140	
					7.2	30	7.2	31.6	15.8	3.16	1.58	440	230	
					8.6	25	8.6	50.0	30.0	5.00	3.00	580	330	
					4.0	21	4.0	6.0	3.3	0.74	0.41	186	102	
Saady y Massé (2015)	Paja de trigo y estercol de vaca	20	8	21	5.0	6.5	54	3.5	0.82	0.44	163	88		
					6.0	21	6.0	7.2	4.0	0.90	0.50	150	84	
					0.9	20	0.9	1.4	0.8	0.46	0.27	315	183	
					1.3	15	1.3	2.2	1.2	0.72	0.41	309	176	
					0.9	20	0.9	1.7	1.0	0.57	0.33	361	190	
					1.3	15	1.3	2.2	1.3	0.72	0.42	320	186	
					2.1	20	2.1	2.9	1.8	0.96	0.61	494	316	
					2.5	15	2.5	2.7	1.7	0.89	0.56	449	283	
					1.7	20	1.7	3.1	1.9	1.02	0.62	367	224	
					2.7	15	2.7	3.7	2.2	1.23	0.74	276	166	
Borowski (2015)	RO + lodo de purga	35	3	47	0.5	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39		
					2.5	40	0.8	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	
					4.0	20	0.7	0.60	0.4	0.22	0.13	607	364	
					0.5	47	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39	
					2.5	40	0.8	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	
					4.0	20	0.7	0.60	0.4	0.22	0.13	607	364	
Gómez et al. (2006)	RO + lodo de purga	35	3	40	0.8	0.8	57	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	
					4.0	20	0.7	0.60	0.4	0.22	0.13	607	364	
					0.5	47	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39	
					2.5	40	0.8	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	
					4.0	20	0.7	0.60	0.4	0.22	0.13	607	364	
					0.5	47	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39	
Mu et al. (2020)	RO + lodo de purga	37	0.3	20	4.0	0.7	60	0.4	0.22	0.13	607	364		
					0.5	47	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39	
					2.5	40	0.8	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	
					4.0	20	0.7	0.60	0.4	0.22	0.13	607	364	
					0.5	47	0.5	58	0.3	0.17	0.10	67	39	
					2.5	40	0.8	0.5	0.27	0.15	107	61		
					3.3	37	1.3	0.8	0.43	0.25	142	82		
					3.6	37	1.0	0.59	0.6	0.33	0.20	100	59	

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	TRH (d)	COV _o (g-SV/L/d)	PB (L-Biogás/d)	CH ₄ (%)	PM (L-CH ₄ /d)	TPB (L-Biogás/L _{react} /d)	TPM (L-CH ₄ /L _{react} /d)	REB (L-Biogás/kg-SV _{anadidos})	REM (L-CH ₄ /kg-SV _{anadidos})
Cheng et al. (2021)	RO + lodo de purga	38	0.1	16	4.0	0.1	61	0.1	0.01	0.01	259	158
		37	380	22	1.2	68.4	61	41.7	0.18	0.11	150	90
Cavinato et al. (2013)	RO + lodo activado de purga	55		24	1.6	201.4	60	121.6	0.53	0.32	340	200
				22	1.7	296.4	62	182.6	0.78	0.48	490	289
				22	2.2	471.2	62	293.1	1.24	0.77	570	349
Hamrouni y Cheikh (2020)	RO + lodo de purga	37	2,000,000	22	1.6	1,120,000.0	60	672,000.0	0.56	0.34	350	207
		55		30	1.3	1,400,000.0	65	840,000.0	0.70	0.42	550	328
Bolzonella et al. (2006)	RO	37	1.5	10	2.5	1.4	65	0.9	0.92	0.60	366	238
				10	8.0	4.0	60	2.4	2.67	1.60	333	200
Liu et al. (2012)	RO + lodo activado de purga	36	3,000,000	22	0.8	582,000.0	64	372,480.0	0.34	0.12	430	159
				20	1.2	960,000.0	66	628,800.0	0.32	0.21	260	173
				50	2.4	2,750.0	57	1,556.5	1.72	0.97	720	410
Aljbour et al. (2021)	RO + lodo activado de purga (0:100)	35	1,704	33	3.6	3,800.0	57	2,181.2	2.23	1.36	660	380
				25	4.8	5,600.0	59	3,287.2	3.50	2.05	730	430
El-Mashad y Zhang (2010)	RO + lodo activado de purga (20:80)		1,567	20	6.0	6,660.0	56	3,722.9	4.25	2.33	720	390
				20	3.9	9.2	50	4.6	2.30	1.15	598	299
			4	30	4.0	13.8	53	7.3	3.44	1.82	864	458
				20	1.5	0.3	69	0.2	0.61	0.42	406	281
				30	1.0	0.2	69	0.2	0.44	0.30	436	302
				20	7.5	1.3	57	0.8	2.63	1.50	351	200
				30	5.0	1.0	57	0.6	2.02	1.14	404	228
				20	5.5	0.9	66	0.6	1.82	1.20	331	218
				30	3.7	0.7	66	0.4	1.34	0.88	366	241
				20	12.1	3.1	49	1.5	6.27	3.08	520	256
Bouallagui et al. (2009)	RO	35	0.5	30	8.0	2.6	54	1.4	5.28	2.84	657	353
				20	10.0	2.1	61	1.3	4.11	2.51	411	251
Habiba et al. (2009)	Primera mezcla (RO-32:68-estiercol)	30		30	6.7	1.5	62	0.9	3.03	1.88	455	282
				20	10.5	2.6	58	1.5	5.29	3.08	504	293
Habiba et al. (2009)	Segunda mezcla (RO-48:52-estiercol)	30		30	7.0	1.9	59	1.1	3.72	2.18	531	311
				20	3.7	20.9	65	13.6	1.16	0.75	695	203
				15	4.5	25.4	60	15.2	1.41	0.85	629	188
				12	5.2	32.0	58	18.6	1.78	1.03	582	200
				20	3.8	29.3	64	18.8	1.63	1.04	707	275
				15	4.6	39.4	61	24.0	2.19	1.34	641	289
				12	5.5	47.2	55	25.9	2.62	1.44	594	263
				20	3.2	42.1	57	24.0	2.34	1.33	638	413
				15	4.1	55.8	54	30.1	3.10	1.67	614	410
				12	4.9	57.6	50	28.8	3.20	1.60	514	328
Habiba et al. (2009)	RO y lodo anaerobio	35	2	20	0.3	0.1	58	0.1	0.07	0.04	290	146
				20	0.3	0.3	59	0.2	0.14	0.08	470	278

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	TRH (d)	COV _o (g-SV/L/d)	PB (L-Biogás/d)	CH ₄ (%)	PM (L-CH ₄ /d)	TPB (L-Biogás/L _{reactor} /d)	TPM (L-CH ₄ /L _{reactor} /d)	REB (L-Biogás/kg-SV _{anadidos})	REM (L-CH ₄ /kg-SV _{anadidos})
	obtenidos de un digestor				1.4	0.5	60	0.3	0.24	0.14	569	101
	mesofílico de una PTAR			10	1.0	1.1	59	0.7	0.56	0.33	570	318
	hortofrutícola				1.6	1.3	60	0.8	0.67	0.40	440	257
					1.9	1.8	59	1.0	0.88	0.52	490	278
					2.9	2.3	60	1.4	1.14	0.68	410	239
					3.5	2.4	58	1.4	1.20	0.70	350	202
Yong et al. (2015)	RO, paja de maíz, sorgo y trigo + lodo granular anaerobio de un reactor UASB.	35	1				57				490	281
							52				300	157
							54				320	171
							52				330	171
							60				500	299
					5.0		60				520	313
							68				580	392
							67				540	324
							60				530	316
							58				500	289
Zhang et al. (2013)	RO + lodo de un reactor anaerobio de 20 L que trató las AR de porquerizas.	37	0.2	20	3.4	0.5	52	0.3	2.58	1.34	762	396
Derbal et al. (2009)	RO + lodo de una PTAR municipal.	37	2,000,000	27	1.0	606,000.0	66	398,748.0	0.30	0.20	310	204
Heo et al. (2006)	RO + lodo activado de purga del sedimentador secundario de una PTARM.	35	3.5	13	1.8	1.6	72	1.2	0.47	0.34	257	186
					2.0	2.3	69	1.6	0.65	0.45	332	215
					2.4	4.3	64	2.8	1.24	0.80	503	321
					3.1	6.3	60	3.8	1.80	1.08	558	336
					4.3	9.4	56	5.3	2.69	1.52	633	346
Heo et al. (2006)	RO + lodo activado de purga.	35	0.5									489
												542
												522
												515
												505
												503
												493
												250
												240
												220
												200
												150
												20
												0
												0
												0
												300
												280
												250
												220
												200
Gou et al. (2014)	RO + lodo activado de purga.	45	2	7	1.0	0.8	71	0.6	0.42	0.30	420	300
					2.0	1.6	70	1.1	0.80	0.56	399	280
					3.0	2.4	62	1.5	1.20	0.75	400	250
					4.0	3.0	58	1.8	1.50	0.88	377	220
					5.0	3.2	63	2.0	1.60	1.01	318	200

Autor	Sustrato	T _{op} (°C)	V (L)	TRH (d)	COV _o (g-SV/L/d)	PB (L-Biogás/d)	CH ₄ (%)	PM (L-CH ₄ /d)	TPB (L-Biogás/L _{react} /d)	TPM (L-CH ₄ /L _{react} /d)	REB (L-Biogás/kg-SV _{anadidos})	REM (L-CH ₄ /kg-SV _{anadidos})
				6	6.0	2.4	76	1.8	1.20	0.91	198	150
				5	7.0	1.2	35	0.4	0.60	0.21	85	30
				4	8.0	0.6	0	0.0	0.30	0.00	37	0
				33	1.0	1.2	67	0.8	0.60	0.40	601	400
				17	2.0	2.0	76	1.5	1.00	0.76	499	380
				11	3.0	2.8	75	2.1	1.40	1.05	467	350
				8	4.0	3.4	70	2.4	1.70	1.20	427	300
	2	55		7	5.0	3.8	77	2.9	1.90	1.46	378	290
				6	6.0	4.2	69	2.9	2.10	1.45	347	240
				5	7.0	3.4	75	2.5	1.70	1.27	241	180
				4	8.0	1.2	13	0.2	0.60	0.08	74	10

PTAR: planta de tratamiento de aguas residuales; LAPC: lodo activado de purga concentrado; RO: residuos orgánicos; AR: aguas residuales; PTARM: planta de tratamiento de aguas residuales municipales;

8. Tasa de producción de biogás y metano

En la Tabla 5 y 6 se muestra el promedio de la TPB y TPM de cada una de las corridas experimentales. En la Figura 20 se aprecia con más detalle la variación de este parámetro, donde la TPB y la TPM se comportan de manera directamente proporcional. La TPB obtenida estuvo en el rango de 0.8 a 1.8 L-biogás/L_r/d. De la C1 a la C4, la TPB fue de 0.8 a 0.9 L-biogás/L_r/d, no obstante, en las C5 este resultado incrementó a 1.0 L-biogás/L_r/d, como consecuencia del incremento de la temperatura de operación de 20.3 a 21.5 °C. En la C6 (día de operación 490) se obtuvo la TPB más alta, de 1.8 L-biogás/L_r/d, debido al incremento de la temperatura de operación de 20.3 a 21.5 °C y al incremento del flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d. Sin embargo, posterior al aumento del flujo de alimentación y la COV_o de 1.3 a 1.8 g-SV/L/d, estos parámetros operacionales desestabilizaron el DASEP, repercutiendo en una baja TPB.

En el caso de la TPM, durante todas las etapas experimentales, los valores estuvieron en el rango de 0.4 a 1.1 L-CH₄/L_r/d. De la C1 a la C4, la TPM fue de 0.4 a 0.5 L-CH₄/L_r/d, no obstante, en las C5 este resultado incrementó a 0.6 L-CH₄/L_r/d, como consecuencia del incremento de la temperatura de operación de 20.3 a 21.5 °C. En la C6 (día de operación 490) se obtuvo la TPM más alta, de 1.1 L-CH₄/L_r/d, debido al incremento de la temperatura de operación de 20.3 a 21.5 °C y al incremento del flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d. Sin embargo, posterior al aumento del flujo de alimentación y la COV_o de 1.3 a 1.8 g-SV/L/d, estos parámetros operacionales desestabilizaron el DASEP, repercutiendo en una baja TPM.

Los valores de TPB y TPM de la actual investigación presentan similitud con los expuestos en la investigación de Liu et al. (2018) (Tabla 7) donde realizan CoD de RO y LAP en un digester de 3 L a 37 °C, TRH de 16 a 40 días y COV_o de 1.0 a 2.5 g-SV/L/d. La TPB que ellos obtuvieron fue de 0.5 a 2.0 L-biogás/L_r/d y TPM de 0.2 a 1.2 L-CH₄/L_r/d.

Los valores de la presente investigación también son similares a los obtenidos por Gou et al. (2014). Donde realizaron CoD con RO provenientes de un comedor universitario y LAP obtenido del sedimentador secundario de una PTAR municipal, temperaturas de 35, 45 y 55

°C, volumen de reactor de 2 L, TRH de 4.2 a 33.3 días y COV_o de 1 a 8 g-SV/L/d. La TPB que ellos obtuvieron fue de 0 a 2.1 L-biogás/L_r/d y TPM de 0 a 1.5 L-CH₄/L_r/d.

Los trabajos que se mencionan a continuación presentan valores bajos de TPB y TPM en relación con los obtenidos en la actual investigación. Uno de ellos es el de Álvarez y Lidén, (2008) donde realizaron CoD con estiércol de llama, vaca y oveja, con rangos de temperatura psicrófila y termófila, volumen de reactor de 9.3 L, TRH de 30 días y COV_o de 2.0 a 2.1 g-SV/L/d. Obtuvieron TPB de 0.2 a 0.5 L-biogás/L_r/d y TPM de 0.1 a 0.2 L-CH₄/L_r/d. Otro trabajo es el de Blanco et al. (2010) donde realizaron CoD de estiércol de vaca y residuos de papa, a 35 °C, volumen de reactor de 3 L, TRH de 90 días y COV_o de 0.8 a 1.0 g-SV/L/d. La TPB fue de 0.1 y 0.3 L-biogás/L_r/d y TPM de 0.08 y 0.2 L-CH₄/L_r/d.

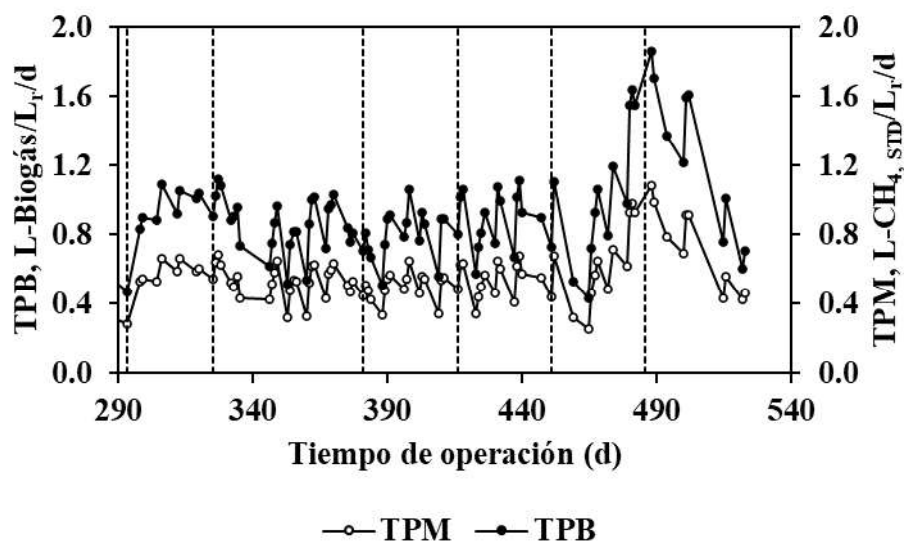


Figura 20. Tasa de producción de metano y biogás durante las seis corridas experimentales. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

9. Rendimiento específico de biogás y metano

En la Tabla 5 y 6 se expone el comportamiento del REB y REM durante cada una de las corridas experimentales, dichos resultados están reportados a condiciones estándar de temperatura (0 °C) y presión (1 atm). En la Figura 21 se aprecia con más detalle la variación de dichos resultados, donde el REB y REM se comportan de manera directamente proporcional. El REB estuvo en el rango de 571 a 721 L-biogás/kg-SV_{añadidos}, durante las corridas experimentales. Al inicio de la C2 (día de operación 325), se aprecia un descenso del REB de 640 a 390 L-biogás/kg-SV_{añadidos}, debido al incremento del flujo de alimentación de 1.0 a 1.5 L/d, un incremento en la COV_o de 1.6 a 2.3 g-SV/L/d, al descenso en la temperatura de operación de 22.8 a 19.8 °C y a la disminución del TRH de 70 a 47 días. A manera de solución, se optó por disminuir el flujo de alimentación de 1.5 a 1.0 L/d, disminuir la COV_o de 2.3 a 1.3 g-SV/L/d y aumentar el TRH de 47 a 70 días. A raíz de estos cambios, se aprecia como el REB aumentó de 390 a 490 L-biogás/kg-SV_{añadidos} y se mantuvo estable en las corridas próximas (C2, C3 y C4).

En la C5 (día de operación 466), el REB disminuyó de 724 a 271 L-biogás/kg-SV_{añadidos}, debido a la disminución de la temperatura ambiente de 19.0 a 17.8 °C, la cual también repercutió en un ligero descenso del pH de 7.6 a 7.3. Posteriormente, la temperatura ambiente aumentó de 17.8 a 21 °C (día de operación 468), lo cual repercutió en el incremento del REB de 250 a 640 L-biogás/kg-SV_{añadidos} y el pH de 7.3 a 7.8. Con el paso de los días de operación, el REB continuó aumentando hasta llegar a 1046 L-biogás/kg-SV_{añadidos} (día de operación 481).

En la C6, al incrementar el flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d y al descenso de la temperatura ambiente de 21.8 a 19 °C, el REB disminuyó de 1046 a 654 L-biogás/kg-SV_{añadidos} (día de operación 500), y con ello, también se presentó un descenso en el pH de 7.4 a 6.7. A manera de solución, se optó por disminuir el flujo de alimentación de 1.5 a 1.0 L/d; con ello, el REB aumentó de 654 a 898 L-biogás/kg-SV_{añadidos} (día de operación 502). El REB disminuyó nuevamente (día de operación 515) de 898 a 461 L-biogás/kg-SV_{añadidos}, debido al descenso de la temperatura ambiente de 23 a 19.8 °C. La temperatura ambiente aumentó de 19.8 a 23 °C, y con ello, también el REB de 460 a 630 L-biogás/kg-SV_{añadidos}.

(día de operación 516). Posterior a esto, el DASEP se desestabilizó, repercutiendo de manera negativa en el rendimiento de este, por ello, se optó por concluir la etapa experimental en el de operación 523.

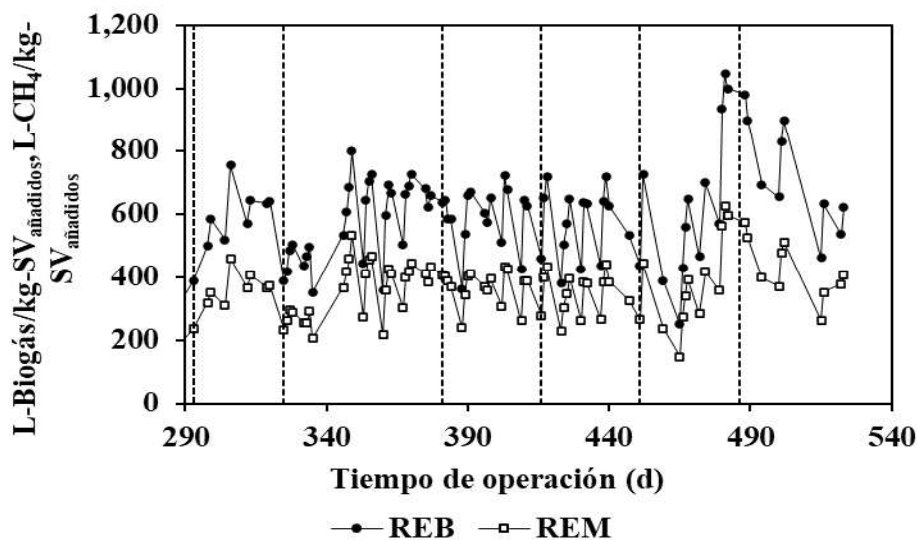


Figura 21. Rendimiento específico de biogás y de metano durante las seis corridas experimentales. Las líneas punteadas verticales indican las corridas experimentales.

El REM estuvo en el rango de 347 a 424 L-CH₄/kg-SVañadidos, durante las corridas experimentales (Figura 21). Al inicio de la C2 (día de operación 325), se aprecia un descenso del REM de 320 a 233 L-CH₄/kg-SVañadidos, debido al incremento del flujo de alimentación de 1.0 a 1.5 L/d, un incremento en la COV_o de 1.6 a 2.3 g-SV/L/d, al descenso en la temperatura de operación de 22.8 a 19.8 °C y a la disminución del TRH de 70 a 47 días. A manera de solución, se optó por disminuir el flujo de alimentación de 1.5 a 1.0 L/d, disminuir la COV_o de 2.3 a 1.3 g-SV/L/d y aumentar el TRH de 47 a 70 días. A raíz de estos cambios, se aprecia como el REM aumentó de 233 a 290 L-CH₄/kg-SVañadidos y se mantuvo estable en las corridas próximas (C2, C3 y C4).

En la C5 (día de operación 466), el REM disminuyó de 442 a 147 L-CH₄/kg-SVañadidos, debido a la disminución de la temperatura ambiente de 19.0 a 17.8 °C, la cual también repercutió en un ligero descenso del pH de 7.6 a 7.3. Posteriormente, la temperatura ambiente aumentó de 17.8 a 21 °C (día de operación 468), lo cual repercutió en el incremento del REM de 250 a 640 L-CH₄/kg-SVañadidos y el pH de 7.3 a 7.8. Con el paso de

los días de operación, el REM continuó aumentando hasta llegar a 626 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} (día de operación 481).

En la C6, al incrementar el flujo de alimentación de 1.25 a 1.5 L/d y al descenso de la temperatura ambiente de 21.8 a 19 °C, el REM disminuyó de 626 a 370 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} (día de operación 500), y con ello, también se presentó un descenso en el pH de 7.4 a 6.7. A manera de solución, se optó por disminuir el flujo de alimentación de 1.5 a 1.0 L/d; con ello, el REM aumentó de 370 a 511 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} (día de operación 502). El REM disminuyó nuevamente (día de operación 515) de 502 a 262 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}, debido al descenso de la temperatura ambiente de 23 a 19.8 °C. La temperatura ambiente aumentó de 19.8 a 23 °C, y con ello, también el REB de 262 a 351 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} (día de operación 516). Posterior a esto, el DASEP se desestabilizó, repercutiendo de manera negativa en el rendimiento de este, por ello, se optó por concluir la etapa experimental en el día de operación 523.

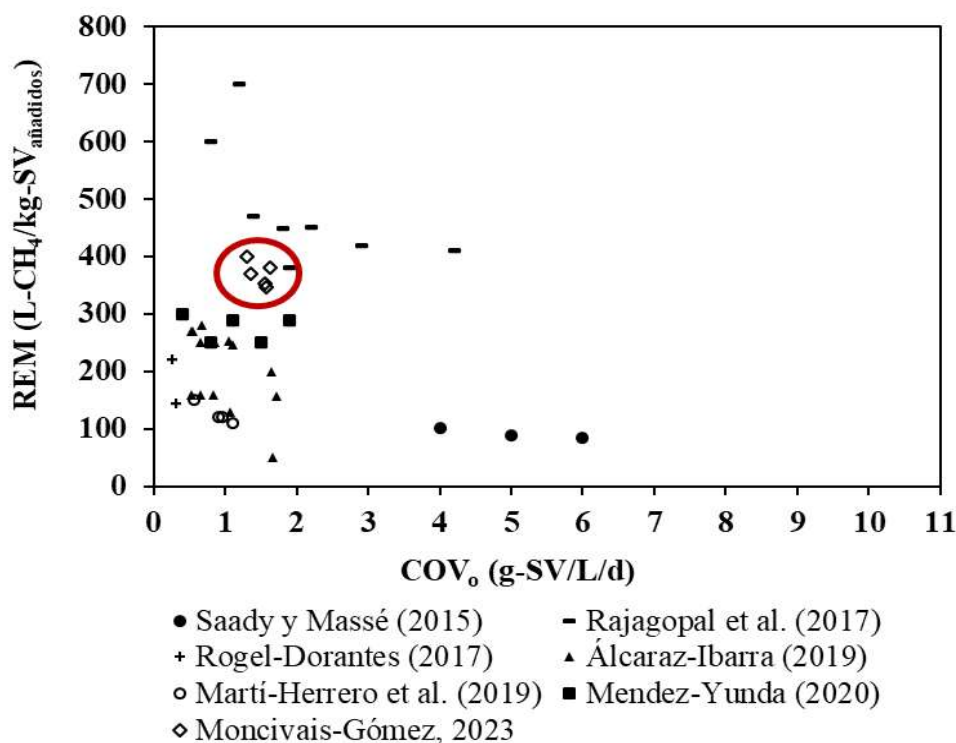


Figura 22. Comparación del rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación psicrófila.

En la Figura 22 se muestra la relación del REM y la COV_o de seis investigaciones a condiciones psicrófilicas y se comparan con el REM de la actual investigación. La mayoría de los autores utilizaron COV_o de 0.3 a 2 g-SV/L/d y obtuvieron REM de 100 a 400 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}. En la actual investigación las COV_o fueron de 1.3 a 1.8 g-SV/L/d, valores dentro de las investigaciones antes mencionadas, pese a ello, el REM obtenido fue de 347 a y 424 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}. Los únicos REM que fueron mayores a los obtenidos en esta investigación fueron los presentados por Rajagopal et al. (2017), sin embargo, dichos REM tienen que ser revisados debido a que el TRH fue subestimado por un factor de 10, mientras que la COV_o fue sobrestimada por un factor de 6.5.

Álvarez y Lidén (2008) realizaron CoD con estiércol de llama, vaca y oveja, con temperatura de operación de 11 a 35 ° C, COV_o de 2.0 a 2.1 g-SV/L/d. El REM que obtuvieron fue de 69 a 109 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}, el cual fue menor al de la actual investigación, pese a utilizar rangos de temperatura iguales y mayores a la presente.

Saad y Massé (2015) realizaron CoD con paja de trigo y estiércol de vaca, a condiciones psicrófilicas y COV_o de 4 a 6 g-SV/ L/d. El REM que obtuvieron fue de 84 a 102 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}, menor que los valores reportados en la actual investigación, esto debió al empleo de COV_o altas.

Martí-Herrero et al. (2019) realizaron CoD de RO y rumen de vaca a condiciones de operación psicrófila, TRH de 87 a 162 días y COV_o de 0.6 a 1.1 g-SV/L/d. El REM fue de 110 a 150 L- CH_4 /kg-SV_{añadidos}, los cuales fueron menores a los obtenidos en el presente trabajo, esto se debe a las COV_o bajas (0.9, 1.1, 1.0, y 0.6 g-SV/ L/d).

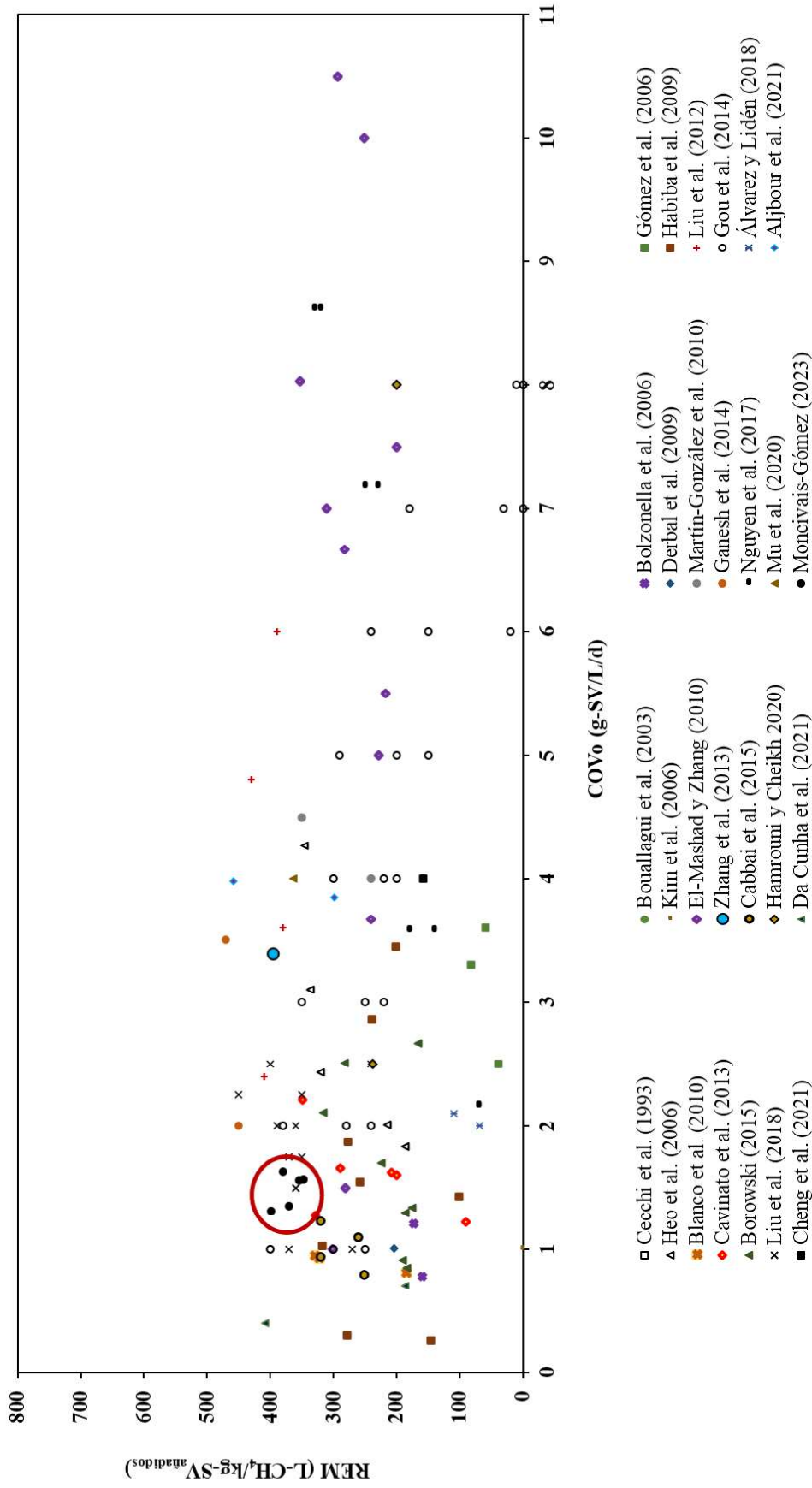


Figura 23. Comparación del rendimiento específico de metano y la carga orgánica volumétrica aplicada, a condiciones de operación mesofílica y termofílica.

En la Figura 23 se observa la relación entre el REM y la COV_o a condiciones de operación mesofílica y termofílica. Las COV_o están en el rango de 0.26 a 10.5 g-SV/L/d, las cuales son mucho mayores a las utilizadas en DA psicofílica y a las utilizadas en esta investigación (1.3 a 1.8 g-SV/L/d). Sin embargo, los REM de la actual investigación son mayores a lo reportado en el 80 % de los reportes de literatura revisados de digestores mesofílicos y termofílicos, lo que quiere decir que los microorganismos encargados del proceso de DA de este trabajo, están tan adaptados al frío que pueden generar rendimientos altos.

En el caso de Gou et al. (2014) operaron con tres temperaturas. Para la temperatura de 35 °C, el REM fue de 0 a 250 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}, para 45 °C de 0 a 300 L-CH₄/kg-SV_{añadidos} y para 55 °C de 10 a 400 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. El REM de la presente investigación se asemeja a los valores obtenidos por Gou et al. (2014) a 55 °C, por tanto, a pesar de operar a baja temperatura, el REM es comparable con los resultados de la literatura. El REM obtenido a 55 °C y a COV_o de 1, 2 y 3 g-SV/ L/d es similar al REM de la actual investigación, con una diferencia de temperatura de operación de 35 °C, ahorrándose la energía de calentamiento del DASEP.

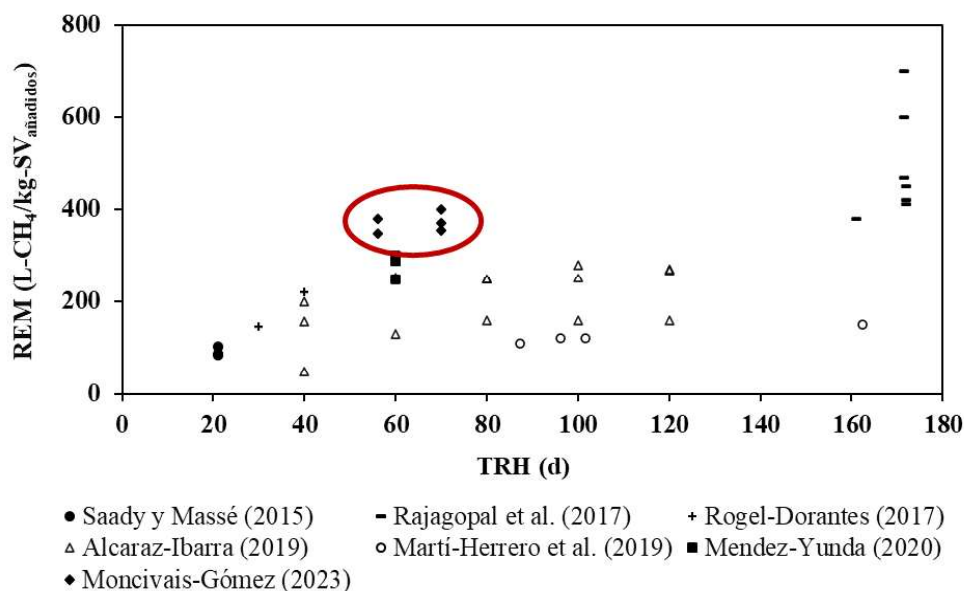


Figura 24. Correlación del rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulico a condiciones de operación psicofílica.

En la Figura 24 se expone la relación entre el REM y el TRH a condiciones de operación psicrófila. El TRH que se manejaron van de 20 a 120 días. El REM que obtuvieron va de 100 a 300 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Sin embargo, Rajagopal et al. (2017) operó con TRH de 161 a 181 días y obtuvo un REM de 380 a 700 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Por otro lado, en la actual investigación el TRH fue de 47 a 70 días, mientras que el REM estuvo entre 347 a 424 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}, valores más altos que los de las 5 investigaciones antes mencionadas, a excepción de Rajagopal et al. (2017).

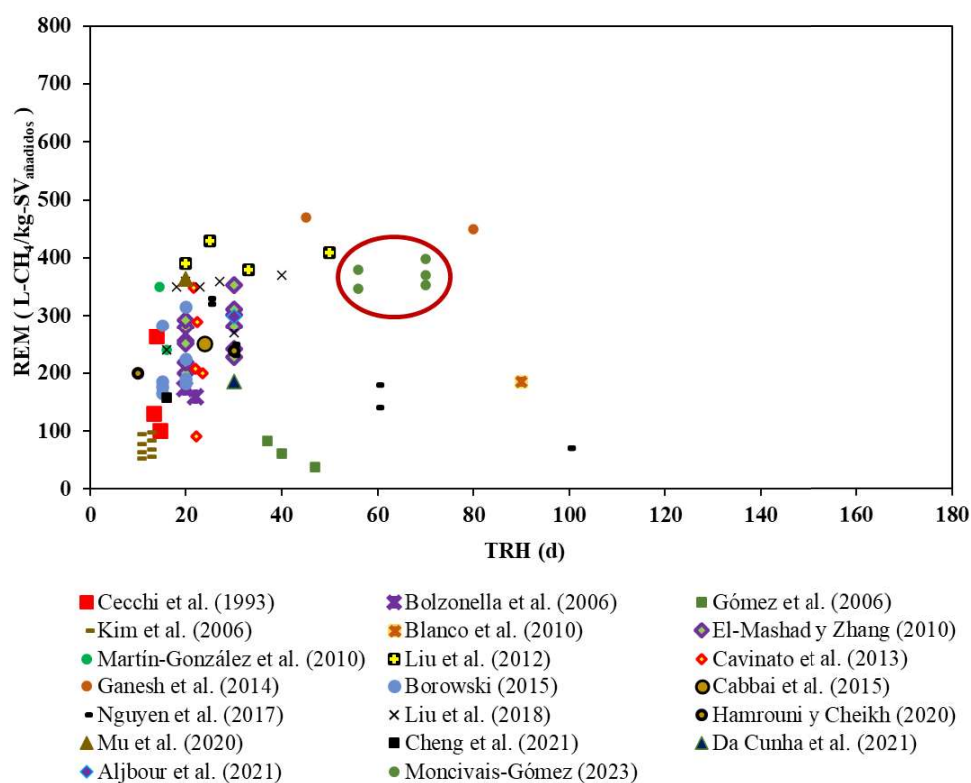


Figura 25. Comparación del rendimiento específico de metano y el tiempo de retención hidráulica a condiciones de operación mesofílica y termofílica.

En la Figura 25 se observa la la relación entre el REM y el TRH a condiciones de operación mesofílica y termofílica, la mayoría de las investigaciones operan a un TRH de 10 y 40 días, obteniendo un REM entre 100 y 450 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}. Por otro lado, en la actual investigación se manejaron tres TRH de 47 a 70 días y el REM que se obtuvo fue de 347 a 424 L-CH₄/kg-SV_{añadidos}, se aprecia que dichos REM son similares a los de investigaciones

con temperaturas de operación de 30 a 55 °C. Lo cual repercute en un ahorro económico y energético al no suministrar energía externa para el calentamiento del DASEP.

10. Rendimiento específico metano modelado con la ecuación modificada de Gompertz

El REM se modeló con la curva modificada de Gompertz para predecir su comportamiento a lo largo del proceso de DA. En la Tabla 8 se aprecia la comparativa de las constantes cinéticas de la ecuación modificada de Gompertz de investigaciones de la literatura y de la actual investigación.

En la actual investigación, al analizar la curva del REM contra el tiempo, se observó la presencia de dos sustratos debido a la forma de la curva. Se observó un sustrato fácilmente biodegradable (sustrato 1), representado por la fracción soluble de la CoD y que se biodegrada en un lapso de 0 a 6 horas, y un sustrato lentamente biodegradable (sustrato 2), representado por la fracción particulada de la CoD y que se biodegrada en un lapso de 6 a 24 horas. En el caso del sustrato 1, el rendimiento específico máximo ($H_{\text{máx}}$) fue de 0.24 a 0.79 L-CH₄/g-SV_{añadidos}, la producción específica de metano máxima ($R_{\text{máx}}$) de 0.08 a 0.55 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d y el tiempo de latencia (lag-phase) (λ_o) de 0 a 0.03 d. En el sustrato 2, $H_{\text{máx}}$ fue de 0.33 a 0.66 L-CH₄/g-SV_{añadidos}, $R_{\text{máx}}$ de 0.65 a 0.94 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d y λ_o de 0 a 0.87 d. Se observa que en la mayoría de los casos $H_{\text{máx}}$ es mayor en el sustrato 1, debido a que los microorganismos degradan y metabolizan primero la fracción orgánica fácilmente biodegradable del sustrato y por ende hay una producción rápida y alta de CH₄. En el sustrato 2, $H_{\text{máx}}$ es menor, dado que los microorganismos necesitan más tiempo para poder degradar la materia orgánica lentamente biodegradable.

Se esperaba que $R_{\text{máx}}$ también fuese mayor en el sustrato 2, no obstante, resultó ser menor, esto indica que la materia orgánica lentamente biodegradable produce más CH₄, con respecto a los SV_{añadidos} y el tiempo de operación. En el caso de λ_o , los valores son menores en el sustrato 1 debido a que los microorganismos degradan más rápidamente ese sustrato y el tiempo para degradar la materia orgánica soluble y producir CH₄ es menor.

En el caso de Nielfa et al. (2015) realizaron pruebas de PBM mediante CoD de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales y lodo biológico, a condiciones mesofílicas, con una relación inóculo-sustrato (I/S) de 1/1, durante 39 días. El valor que ellos

obtuvieron de $H_{m\acute{a}x}$ fue de 0.06 a 0.30 L-CH₄/g-SV_{añadidos}, $R_{m\acute{a}x}$ de 0.003 a 0.05 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d y λ_o de 0 a 2.5 d. Los valores de $H_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{a}x}$ que ellos obtuvieron son menores a los expuestos en la actual investigación.

Alcaraz-Ibarra (2019) realizó pruebas de PBM mediante CoD de ROC (receta sintética) y LAPC, a condiciones psicrófilicas, con una relación (I/S) de 1.16, durante 130 días. El valor de $H_{m\acute{a}x}$ que obtuvo fue de 0.07 a 0.29 L-CH₄/g-SV_{añadidos} y $R_{m\acute{a}x}$ de 0.002 a 0.092 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d, los cuales son menores a los obtenidos en la actual investigación. λ_o es mayor en comparación con el actual trabajo debido a que los microorganismos necesitaron más tiempo para poder adaptarse al sustrato.

Zhang et al. (2014) realizaron pruebas de PBM mediante CoD con excremento de cerdo y lodos residuales deshidratados a 37 °C, con una relación (I/S) de 2/1, durante 85 días. Los valores que ellos adquirieron para $H_{m\acute{a}x}$ fueron de 0.17 a 0.36 L-CH₄/g-SV_{añadidos} y $R_{m\acute{a}x}$ de 0.005 a 0.02 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d, son menores a los obtenidos en la actual investigación, a pesar de operar a una temperatura y tiempo de digestión mayor. λ_o es mayor en comparación con el actual trabajo debido a que los microorganismos necesitaron más tiempo para poder adaptarse a su sustrato y a que el tiempo de contacto fue mucho más largo (85 días) que la presente investigación (1 d).

Elsayed et al. (2022) realizaron pruebas de PBM mediante CoD con lino y lodos residuales a 37 °C, durante 30 días. Los valores que ellos obtuvieron para $H_{m\acute{a}x}$ fueron de 0.18 a 0.30 L-CH₄/g-SV_{añadidos} y $R_{m\acute{a}x}$ de 0.011 a 0.019 L-CH₄/g-SV_{añadidos}/d, son menores a los obtenidos en la actual investigación, a pesar de operar a una temperatura y tiempo de digestión mayor. λ_o es mayor en comparación con el actual trabajo debido a que los microorganismos necesitaron más tiempo para poder adaptarse a su sustrato y a que el tiempo de contacto fue mucho más largo (30 días) que la presente investigación (1 d).

En los trabajos anteriores se utilizó el BMP para determinar la biodegradabilidad de un sustrato determinado, en reactores con volumen de 0.5 a 2 L. No obstante, en la actual investigación el experimento se llevó a cabo de manera semicontinua, a baja temperatura,

en un DASEP de 70 L. Pese a ello, los valores de las constantes cinéticas son mayores con base en la literatura.

Tabla 8. Constantes cinéticas de la ecuación modificada de Gompertz, de acuerdo con la literatura.

Autor	Sustrato 1			Sustrato 2		
	H_{\max} (L-CH ₄ /g-SV añadidos)	R_{\max} (L-CH ₄ /g-SV añadidos/d)	λ_0 (d)	H_{\max} (L-CH ₄ /g-SV añadidos)	R_{\max} (L-CH ₄ /g-SV añadidos/d)	λ_0 (d)
Zhang et al. (2014)	0.36	0.01	6.9			
	0.17	0.005	1.8			
	0.32	0.02	5.9			
	0.29	0.01	4.8			
	0.28	0.01	3.5			
Nielfa et al. (2015)	0.14	0.03	0.4			
	0.18	0.05	0			
	0.15	0.04	0			
	0.30	0.02	2.5			
	0.16	0.02	0.1			
	0.06	0.003	0			
Alcaraz-Ibarra (2019)	0.22	0.02	0.7			
	0.07	0.002	12.0			
	0.19	0.006	7.8			
	0.11	0.003	11.6			
	0.29	0.003	1.2			
Elsayed et al. (2022)	0.07	0.092	0.5			
	0.18	0.011	8.4			
	0.24	0.017	9			
	0.30	0.019	8.9			
	0.23	0.013	8.1			
Moncivais-Gómez (2023)	0.19	0.014	9.6			
	0.79	0.24	0.03	0.66	0.73	0.23
	0.69	0.55	0.01	0.41	0.65	0.87
	0.43	0.16	0	0.38	0.94	0
	0.24	0.08	0	0.33	0.72	0

H_{\max} : cantidad máxima producida de biogás y/o metano, cuando el sustrato ya se consumió (L-biogás/g-SV añadidos o L-CH₄/g-SV añadidos); R_{\max} : velocidad o tasa de producción de biogás y/o metano (L-biogás/g-SV añadidos/d o L-CH₄/g-SV añadidos/d); λ_0 : tiempo requerido para la producción inicial de biogás o metano (días). t: tiempo total desde el inicio hasta el final de la producción de biogás o metano (días).

En las figuras que se muestran a continuación (Figura 26, 27, 28 y 29), la producción específica de metano medida (R_{Med}) reportada como $L-CH_4/g-SV_{añadidos}/d$ para el periodo entre dos alimentaciones. $R_{Sust 1}$ corresponde al modelaje de la producción específica de metano del sustrato 1, $R_{Sust 2}$ corresponde al modelaje de la producción específica de metano del sustrato 2 y $R_{Sust 1+2}$ corresponde al modelado de ambos sustratos. En los tres casos el modelaje se realizó con base en la primera derivada de la ecuación modificada de Gompertz.

En la Figura 26 se muestra la R para un día de operación, donde se aprecian las tres fases de la curva modelada. Al inicio, la R_{Med} es baja, debido a que los microorganismos no tienen sustrato debido a que es justo antes de alimentar el DASEP, a esta fase se le conoce como iniciación o latencia. Los microorganismos al recibir al sustrato empiezan con la producción de CH_4 y la R empieza a aumentar (fase de incremento exponencial) hasta llegar a un punto máximo (R_{max}) y entonces R empieza a disminuir. Aquí inicia la fase estacionaria o de senescencia, donde la producción de CH_4 disminuye de manera paulatina, debido al consumo del sustrato. Al no haber más alimento, los microorganismos ya no pueden seguir generando CH_4 en el mismo volumen que antes. Este mismo comportamiento se aprecia en las Figuras 27, 28 y 29.

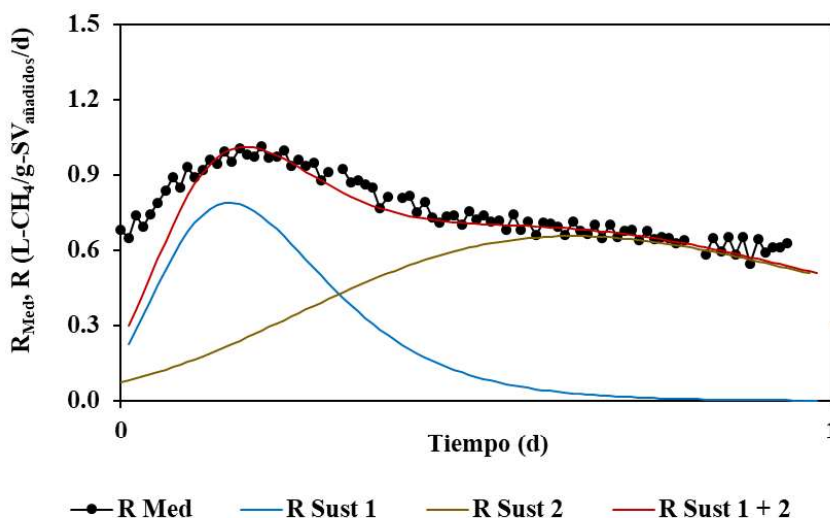


Figura 26. Modelaje de la producción específica de metano (R) con la primera derivada de la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 481.

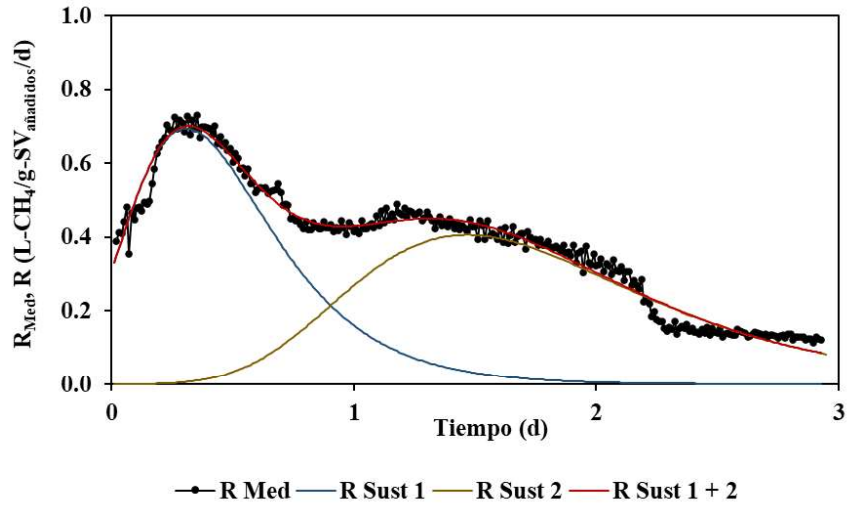


Figura 27. Modelaje de la producción específica de metano (R) con la primera derivada de la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 483.

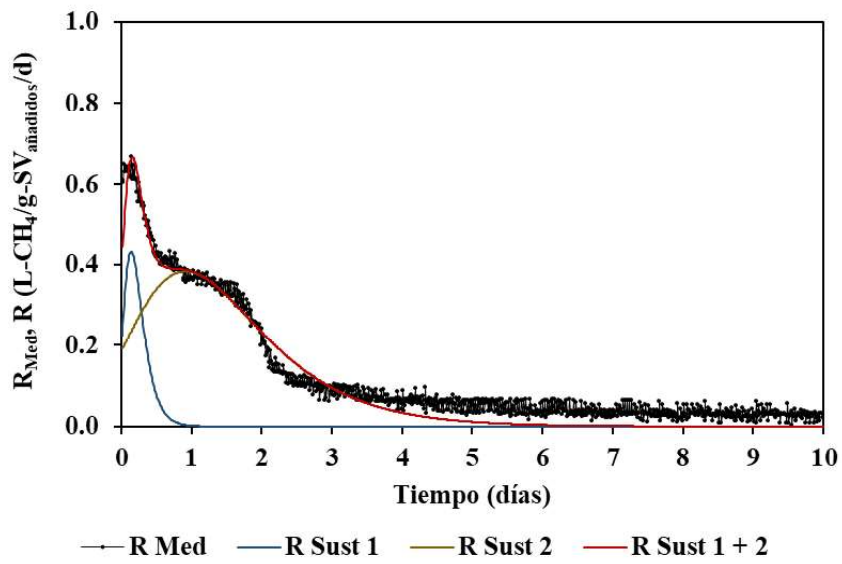


Figura 28. Modelaje de la producción específica de metano (R) con la primera derivada de la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 504.

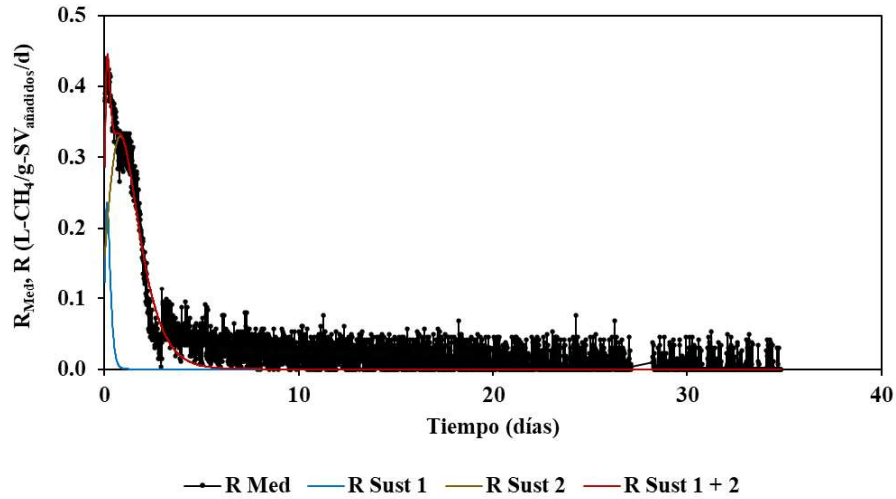


Figura 29. Modelaje de la producción específica de metano (R) con la primera derivada de la ecuación modificada de Gompertz, día de operación 525.

11. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M

En la Figura 30 se aprecia la purificación de biogás con NaOH 5 M, en este caso, el NaOH se saturó con 105 L de biogás y el %-CH₄ disminuyó de 95.21 a 84.35 %, posteriormente, a los 108.48 L ocurrió otra saturación, el %-CH₄ paso de 84.35 a 72.11 %. El flujo empezó en 0.69 L/min, este empezó a descender y mantenerse en 0.31 L/min, finalmente terminó en 0.16 L/min. El pH inicial fue de 13.30 y el final de 10.48. Debido al decremento del flujo de biogás a través de la solución de NaOH, se decidió repetir la prueba con otra bomba que tuviera un flujo más constante.

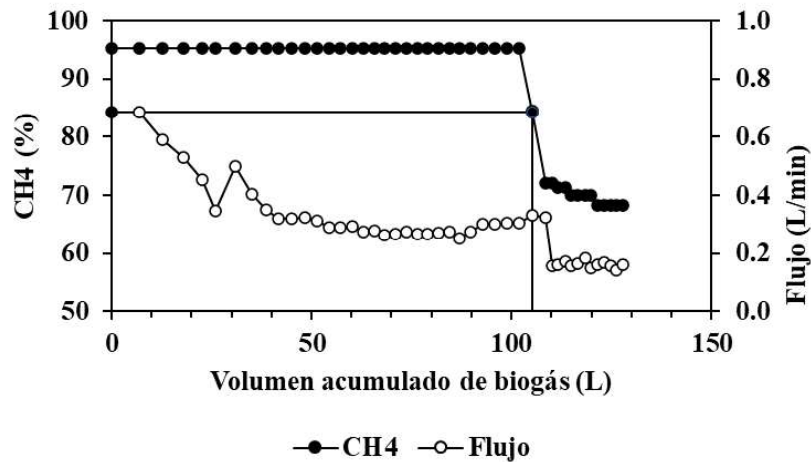


Figura 30. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 1.

En la Figura 31 se muestra que el NaOH se saturó con 162.6 L de biogás y el %-CH₄ disminuyó de 94.48 a 83.55 %; a los 172.2 L ocurrió decremento en la saturación y el %-CH₄ bajó de 83.55 a 78.29 %, posteriormente, a los 201 L el %-CH₄ bajó de 78.29 a 69.08 %. El flujo empezó en 1.38 L/min, posteriormente descendió a 0.75 L/min, esto debido a la utilización de una piedra difusora de acero inoxidable. Se reemplazó la piedra de acero inoxidable por una de cerámica, con ello, el flujo aumentó y se mantuvo constante a lo largo del proceso. El pH inicial fue de 13.56 y el final de 10.37.

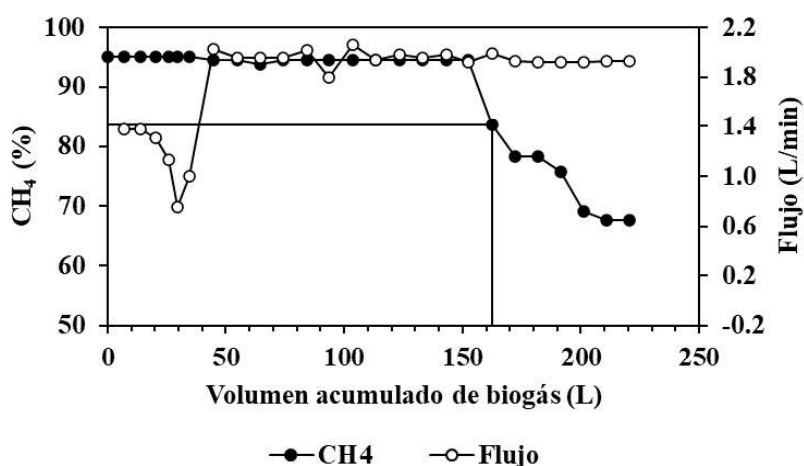


Figura 31. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 2.

En la Figura 32 se muestra que el NaOH se empezó a saturar con 172 L de biogás y el %-CH₄ disminuyó de 94.87 a 90 %, posteriormente, el volumen de biogás fue de 181.5 L y el %-CH₄ disminuyó de 90 a 74.36 %, este disminuyó lentamente a medida que el volumen de biogás iba aumentando; el %-CH₄ final fue de 61.69 % con un volumen de biogás purificado de 657.51 L. El flujo inició en 2.02 L/min, se mantuvo constante y finalmente terminó en 1.89 L/min. El pH inicial fue de 13.56 y el final de 10.02.

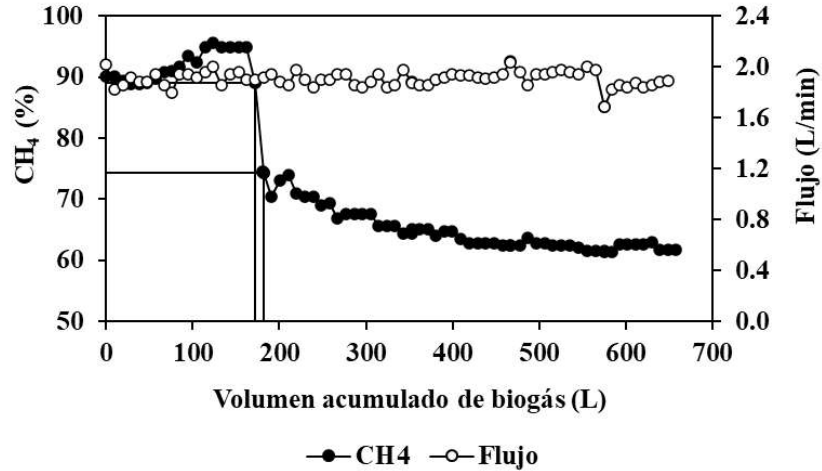


Figura 32. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 3.

En la Figura 33 se muestra que el NaOH se empezó a saturar cuando 283.05 L de biogás fluyeron a través de él, mientras que el %-CH₄ disminuyó de 89.68 a 85.26%; posteriormente, cuando el volumen de biogás purificado fue de 294.05 L, el %-CH₄ bajó de 85.26 a 78.21 %; cuando el volumen de biogás purificado fue de 316.35 L y el %-CH₄ bajó de 78.21 a 70.32%; finalmente cuando el volumen de biogás purificado alcanzó los 391.25 L, el %-CH₄ de bajó de 70.32 a 61.54 %. El flujo inició en 1.87 L/min, a medida que el tiempo fue transcurriendo, el flujo aumento y se mantuvo constante, terminando en 2.20 L/min. El pH inicial fue de 13.56 y el final de 10.12.

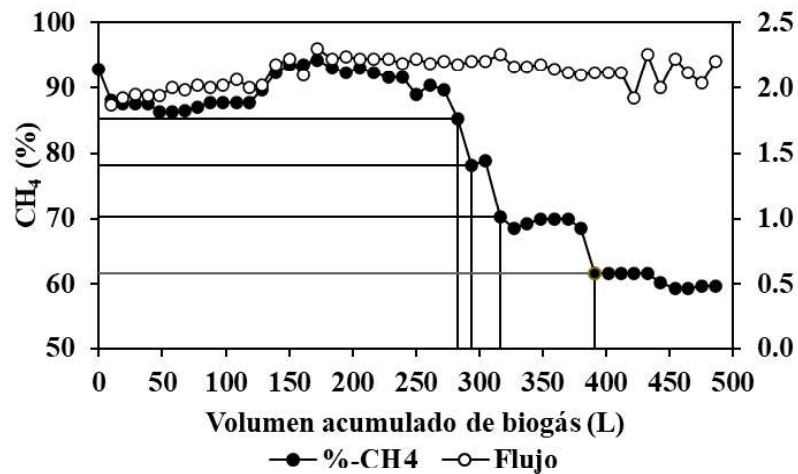


Figura 33. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 4.

En la Figura 34 se muestra que el NaOH se empezó a saturar cuando 214.03 L de biogás fluyeron a través de él y el %-CH₄ disminuyó de 87.82 a 77.42 %; posteriormente, cuando el volumen de biogás purificado fue de 235.33 L, el %-CH₄ bajó de 77.42 a 69.68 %; finalmente cuando el volumen de biogás purificado alcanzó los 353.5 L, el %-CH₄ bajó de 69.68 a 61.29 %. El flujo inició en 2.08 L/min, a medida que el tiempo fue transcurriendo, el flujo se mantuvo constante, terminando en 2.07 L/min. El pH inicial fue de 13.48 y el final de 10.

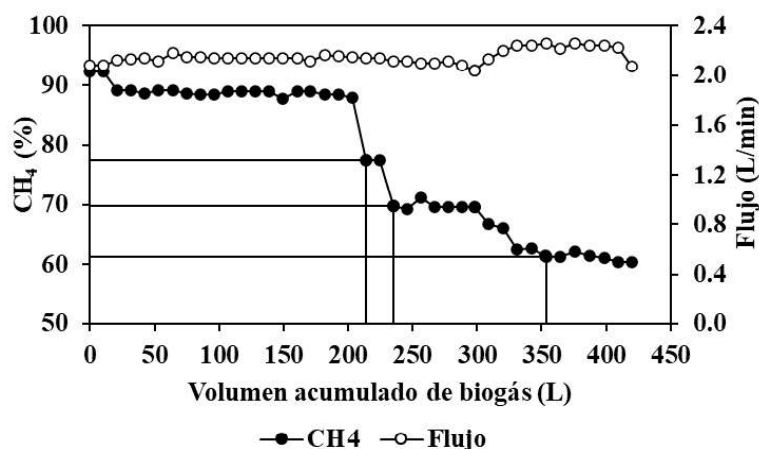


Figura 34. Purificación de biogás con hidróxido de sodio 5 M. Corrida 5.

Los cálculos para determinar el volumen de biogás necesario para saturar la solución de NaOH se realizaron con base en el artículo de Yoo et al. (2013), donde el volumen teórico de saturación es de 327.7 L-Biogás y 131.1 L-CO₂ para un volumen de 0.8 L y una concentración de 5 M de NaOH. Sin embargo, en los ensayos experimentales esto no ocurrió, el NaOH se saturó con 105, 162.6, 172, 283.1 y 214.0 L-Biogás. Esto se puede deber al remanente de humedad en el biogás, la calidad del reactivo y es posible que durante el proceso de purificación se lleven a cabo una serie de reacciones secundarias que afecten el proceso (Yoo et al., 2013). Los resultados de purificación de biogás obtenidos de manera preliminar sirven para mejorar el proceso de purificación y que esto contribuya con investigaciones futuras.

12. Potencial bioquímico de metano

La prueba de PBM duró 7 días, en la Tabla 9 se muestra la caracterización de cada uno de los sustratos empleados.

Tabla 9. Caracterización de los sustratos empleados en el PBM.

Muestra	Co		% SV/ST	pH	Volumen añadido (mL)		Relación I/S
	g-SV/L	g-ST/L			Sustrato	Inóculo	
ROC	95.4	106.8	89.3	4.1	50	150	0.33
LAPC	71.6	78.8	90.8	7.4	50	150	0.44
CoD	91.7	102.6	89.4	4.6	50	150	0.34
Inóculo	31.6	41.7	75.8	7.7	-	160	

ROC: Residuos orgánicos de cocina; LAPC: Lodo activado de purga concentrado;
CoD: Codigestión; Inóculo: Efluente del DASEP.

La relación I/S en promedio fue de 0.37, no obstante, Alcaraz-Ibarra (2019) menciona que dicho valor no debe ser menor a 1, de lo contrario, ocurre acidificación en el sistema y, por ende, una disminución o nula producción de biogás con CH₄.

En la Figura 35 se aprecia el PBM de CoD y ROC. El PBM obtenido en la presente investigación, es menor a los obtenidos en la literatura, debido a que volumen de inóculo y el LAPC dispuesto a DA fue poco (esto con la finalidad de obtener resultados en el menor tiempo posible). El periodo lag-phase debió ser más largo, es probable que el experimento se detuvo antes de comenzar con la PB y PM y la relación I/S debió ser mayor a 1.

Strömberg et al. (2014) mencionan que factores como el tamaño de las partículas, el origen del inóculo, la relación S:I (sustrato: inóculo), la agitación de la muestra, la presión y la temperatura de operación tienen efectos significativos en el PBM. Por otro lado, Alcaraz-Ibarra (2019) realizaron el PBM durante 130 días, y la actual investigación por 7, el periodo de tiempo tan corto pudo haber influenciado en el resultado.

En el caso de los ROC el PBM fue de 0.08 L-CH₄/g-SV_{añadidos} en 2 días y en la CoD el PBM fue de 0.09 L-CH₄/g-SV_{añadidos} en 3 días. Se esperaba que el PBM de la CoD fuese

mayor debido a la mezcla de LAPC y ROC. Alcaraz-Ibarra (2019) obtuvo un valor de 0.07 L-CH₄/g-SV_{añadidos} para los ROC, para la CoD1 y CoD2 de 0.11 y 0.29 L-CH₄/g-SV_{añadidos}. En cuanto al PBM de ROC, tanto el valor de la actual investigación como el de Alcaraz-Ibarra (2019) es similar, en el caso de CoD, el valor es muy superior al nuestro. Como se mencionó anteriormente, se puede deber al tiempo que se dejó en digestión cada sustrato.

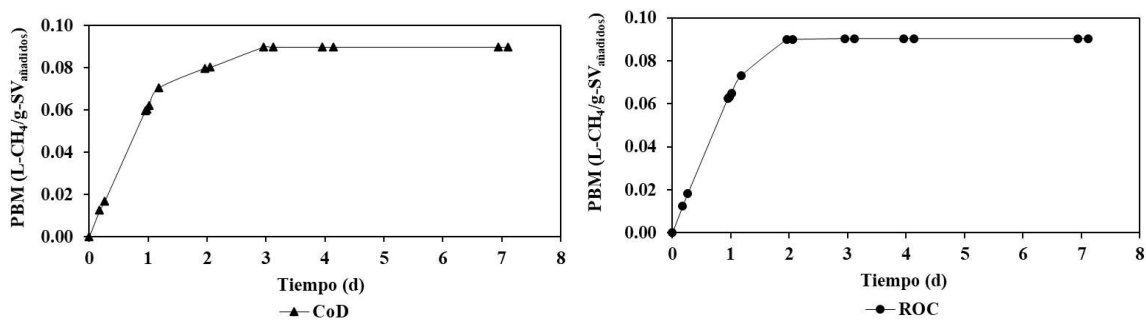


Figura 35. Potencial bioquímico de metano de la mezcla de codigestión (CoD) y residuos orgánicos de cocina (ROC).

Conclusiones

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos en cada una de las etapas experimentales y considerando los objetivos planteados, se concluyó lo siguiente:

- El DASEP operó durante 207 días, mediante CoD de ROC y LAPC, se realizaron 6 corridas experimentales con TRH de 47, 56 y 70 días, flujo de 1.0, 1.25, y 1.5 L/d y COV_o variable.
- De las tres temperaturas de calentamiento de la CoD (25, 30 y 35 °C), la temperatura de 35 °C resultó no ser satisfactoria, repercutiendo en una baja PB.
- Un TRH de 47 días y una COV_o mayor a 1.8 g-SV/L/d induce una disminución en el pH y la acidificación del DASEP.
- El DASEP operó de manera exitosa con ROC, sin la necesidad de utilizar una receta sintética.
- La PB y el %-CH₄ obtenidos durante el proceso de DA estuvieron dentro de los valores obtenidos en investigaciones a condiciones de operación psicofílica, mesofílica y termofílica, lo que convierte a este sistema energéticamente más productivo.
- El REM se ajustó con base en la ecuación modificada de Gompertz; en cada una de las figuras que modela el REM se aprecia una fase de iniciación o latencia, seguido de una fase de incremento exponencial, y finalmente una fase estacionaria.
- El REM de la actual investigación es mayor que el reportado en investigaciones psicofílicas de la literatura y similar a investigaciones con rangos de temperatura mesofílica y termofílica.
- Se cumplió con la hipótesis planteada, el DASEP obtuvo rendimientos similares y en algunos casos mejores con investigaciones de la literatura a condiciones de operación psicofílica, mesofílica y termofílica. Ahorrándose la energía de calentamiento del DASEP.
- El biogás generado puede utilizarse en cocinas de hogares para realizar comidas, incentivando un ahorro en la economía familiar.

Recomendaciones

Con base en las corridas experimentales se recomienda lo siguiente:

- Realizar más corridas donde se empleen TRH menores a 47 días, COV_o mayores a 1.8 g-SV/L/d, y flujo de 1.5 L/d esto con la finalidad de descartar cuál de estas variables es la causante de la disminución en el pH y la acidificación del DASEP.
- En la prueba de PBM se inoculó un volumen menor de sustrato-inóculo en cada una de las botellas, esto con la finalidad de obtener resultados en el menor tiempo posible, sin embargo, esto pudo haber influido en los resultados nulos y bajos. Por lo cual, se recomienda volver a realizar dicho experimento, pero ahora con tiempos de operación más prolongados.
- Realizar el modelaje de todos los días de operación con la curva modificada de Gompertz.

Referencias bibliográficas

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). A brief history of anaerobic digestion and “biogas”. *Biogas energy*, 11-23.
- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 39(1), 35-48.
- Alcaraz-Ibarra, S. (2019). Influencia del tiempo de retención hidráulico sobre la codigestión anaerobia psicrófila de lodo biológico. Tesis de doctorado. Instituto Interamericano de Tecnología y ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Aljbour, S. H., El-Hasan, T., Al-Hamiedeh, H., Hayek, B., & Abu-Samhadaneh, K. (2021). Anaerobic co-digestion of domestic sewage sludge and food waste for biogás production: A decentralized integrated management of sludge in Jordan. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 56(5), 1030-1038.
- Álvarez, R., & Lidén, G. (2008). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource technology*, 99(15), 7278-7284.
- Álvarez, R., Villca, S., & Lidén, G. (2006). Biogás production from llama and cow manure at high altitude. *Biomass and Bioenergy*, 30(1), 66-75.
- Avendaño, D. (2010). Diseño y construcción de un digester anaerobio de flujo pistón que trata los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas. Loja, EC: Universidad Politécnica de Madrid.
- Barrera-Quintero, V., Davila-Gomez, J. A., Acosta, P. R., Hernandez-Rojas, M. E., & Baez-Pimiento, S. (2017). Gompertz Equation's First and Second Derivatives for Kinetics Analysis of Batch Dark Fermentation on Bio-Hydrogen Production. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2(11), 18-22.
- Blanco, D., Lobato, A., Fernández, C., Escapa, A., & Gómez, X. (2010). Batch dry anaerobic codigestion of sheep manure and potato waste. In *Proceedings of 14th RAMIRAN International Conference*. Lisboa, Portugal.
- Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C., & Cecchi, F. (2006). Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). *Water Science and Technology*, 53(8), 203-211.

- Borowski, S. (2015). Codigestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *Journal of environmental management*, 147, 87-94.
- Bouallagui, H., Lahdheb, H., Romdan, E. B., Rachdi, B., & Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. *Journal of environmental management*, 90(5), 1844-1849.
- Budiyono, I. S., & Sumardiono, S. (2013). Kinetic model of biogas yield production from vinasse at various initial pH: comparison between modified Gompertz model and first order kinetic model. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(13), 2798-2805.
- Cabbai, V., De Bortoli, N., & Goi, D. (2015). Pilot plant experience on anaerobic codigestion of source selected OFMSW and sewage sludge. *Waste management*, 49, 47-54.
- Cavinato, C., Bolzonella, D., Pavan, P., Fatone, F., & Cecchi, F. (2013). Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and source sorted biowaste in pilot-and full-scale reactors. *Renewable Energy*, 55, 260-265.
- Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, A., Mata, J., Vallini, G. (1993). Digesting the organic fraction of municipal solid waste: moving from mesophilic (37°C) to thermophilic (55°C) conditions. *Waste Management & Research*. 11, 403-414.
- Cheng, L., Gao, N., Quan, C., Chu, H., & Wang, G. (2021). Promoting the production of methane on the co-digestion of food waste and sewage sludge by aerobic pre-treatment.
- Da Cunha, A. P., Cammarota, M. C., & Volschan Jr, I. (2021). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste: Effect of pre-fermentation of food waste in bench- and pilot-scale digesters. *Bioresource Technology Reports*, 15.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. John Wiley & Sons. Germany. 578.
- El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from codigestion of dairy manure and food waste. *Bioresource technology*, 101(11), 4021-4028.

- Elsayed, M., Andres, Y., & Blel, W. (2022). Modeling of sludge and flax anaerobic co-digestion based on combination of first order and modified Gompertz models: influence of C/N ratio and headspace gas volume. *Desalination Water Treat*, 250, 136-47.
- Ganesh, R., Torrijos, M., Sousbie, P., Lugardon, A., Steyer, J. P., & Delgenes, J. P. (2014). Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: comparison of start-up, reactor stability and process performance. *Waste management*, 34(5), 875-885.
- Ghatak, M. D., & Mahanta, P. (2014). Comparison of kinetic models for biogas production rate from saw dust. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 63, 35.
- Hamrouni, Y. M., & Cheikh, R. B. (2020). Enhancing the energetic potential of Mediterranean food waste by anaerobic co-digestion with sewage sludge. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(2), 512.
- Kim, H. W., Han, S. K., & Shin, H. S. (2004). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste using temperature-phased anaerobic digestion process. *Water science and technology*, 50(9), 107-114.
- Lay, J. J., Li, Y. Y., & Noike, T. (1996). Effect of moisture content and chemical nature on methane fermentation characteristics of municipal solid wastes. *Journal environmental system and engineering*, (552), 101-108.
- Lindmark, J., Thorin, E., Fdhila, R. B., & Dahlquist, E. (2014). Effects of mixing on the result of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1030-1047.
- Liu, C. F., Yuan, X. Z., Zeng, G. M., Li, W. W., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource technology*, 99(4), 882-888.
- Liu, X., Gao, X., Wang, W., Zheng, L., Zhou, Y., & Sun, Y. (2012). Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. *Renewable energy*, 44, 463-468.
- Liu, X., Khalid, H., Amin, F. R., Ma, X., Li, X., Chen, C., & Liu, G. (2018). Effects of hydraulic retention time on anaerobic digestion performance of food waste to

- produce methane as a biofuel. *Environmental Technology & Innovation*, 11, 348-357.
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., & Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del agua*, 3(2), 47-62.
- Martí-Herrero, J., Soria-Castellón, G., Diaz-de-Basurto, A., Alvarez, R., & Chemisana, D. (2019). Biogas from a full-scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 133, 676-684.
- Martín-González, L., Colturato, L. F., Font, X., & Vicent, T. (2010). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: recovering a wasted methane potential and enhancing the biogás yield. *Waste management*, 30(10), 1854-1859.
- Méndez, Y. D. (2020). Digestión anaerobia semicontinua de lodo activado con residuos orgánicos: efecto de la carga orgánica volumétrica. Tesis de maestría. Toluca de lerdo, estado de México.
- Möller, K., Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Eng. Life Sci.* 12(3), 242–257 (2012).
- Mu, L., Zhang, L., Zhu, K., Ma, J., Ifran, M., & Li, A. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge, food waste and yard waste: Synergistic enhancement on process stability and biogás production. *Science of the Total Environment*, 704, 135429.
- Nguyen, D. D., Chang, S. W., Cha, J. H., Jeong, S. Y., Yoon, Y. S., Lee, S. J., & Ngo, H. H. (2017). Dry semi-continuous anaerobic digestion of food waste in the mesophilic and thermophilic modes: New aspects of sustainable management and energy recovery in South Korea. *Energy Conversion and Management*, 135, 445-452.
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5, 14-21.
- Noguera, R. R., Saliba, E. O., & Mauricio, R. M. (2004). Comparación de modelos matemáticos para estimar los parámetros de degradación obtenidos a través de la técnica de producción de gas. *Research for Rural Development*, 16(11).
- Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., Cárdenas-Cleves, L. M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., & Ordóñez-Andrade, J. A. (2014).

- Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 553-562.
- Plasencia, C. (2021). Estudio de codigestión de residuos orgánicos agroindustriales para la producción y uso de biogás. Tesis de maestría: Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica. Querétaro.
- Rajagopal, R., Bellavance, D., & Rahaman, M. S. (2017). Psychrophilic anaerobic digestion of semi-dry mixed municipal food waste: For North American context. *Process safety and environmental protection*, 105, 101-108.
- Saad, N. M. C., & Massé, D. I. (2015). Impact of organic loading rate on the performance of psychrophilic dry anaerobic digestion of dairy manure and wheat straw: long-term operation. *Bioresource technology*, 182, 50-57.
- SEMARNAT. (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde.
- Strömberg, S., Nistor, M., & Liu, J. (2014). Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Waste management*, 34(11), 1939-1948.
- Tangri, N., & Wilson, M. (2017). Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos. *Análisis del Riesgo de las Tecnologías de gasificación y pirólisis de residuos*.
- Veyna, S. (2007). Efecto del control de pH, temperatura y adición de nitrógeno sobre la digestión anaerobia de residuos hortícolas. México D.F. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- Wainaina, S., Awasthi, M. K., Chen, H., Singh, E., Kumar, A., Ravindran, B., Sarsaiya, S., Awasthi, S. K., Liu, T., Duan, Y., Kumar, S., Zhang, Z., Taherzadeh, M. J. (2019). Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies. *Bioresource Technology*. 301, 122778.
- Yoo, M., Han, S. J., & Wee, J. H. (2013). Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution. *Journal of environmental management*, 114, 512-519.

- Zhang, C., Li, J., Liu, C., Liu, X., Wang, J., Li, S., & Zhang, L. (2013). Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion. *Bioresource technology*, 149, 353-358.
- Zhang, W., Wei, Q., Wu, S., Qi, D., Li, W., Zuo, Z., & Dong, R. (2014). Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. *Applied energy*, 128, 175-183.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. J. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and environmental microbiology*, 56(6), 1875-1881.