

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE CERDO Y BIOMASA DE
NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) PARA SU POSIBLE
APROVECHAMIENTO EN ZONAS RURALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA EN
BIOSISTEMAS**

PRESENTA

ING. GENARO LÓPEZ GRIMALDO

General Escobedo, N.L.

Agosto 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE CERDO Y BIOMASA DE
NOPAL (*Opuntia ficus-indica*) PARA SU POSIBLE
APROVECHAMIENTO EN ZONAS RURALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA EN
BIOSISTEMAS**

PRESENTA

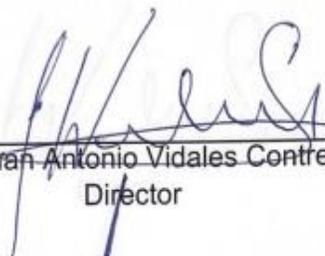
ING. GENARO LÓPEZ GRIMALDO

General Escobedo, N.L.

Agosto 2024

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL
COMITÉ PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON OREINTACIÓN EN INGENIERÍA EN
BIOSISTEMAS

COMITÉ PARTICULAR



Ph D. Juan Antonio Vidales Contreras
Director



Dr. José Rodríguez Rodríguez
Co-Director



Dra. Julia Mariana Márquez Reyes
Asesor



Dr. Humberto Rodríguez Fuentes
Asesor

Dedicatoria

Principalmente a mi familia a mi esposa Esly Fabiola López Cerda y a mis hijos Camila Victoria, Genaro y Emilia por su incondicional apoyo y el hacer que nunca me rindiera en este proyecto emprendido para poder lograr mis metas.

A mi padre Genaro López Rodríguez y a madre María Guadalupe Grimaldo Rueda por su ejemplo de responsabilidad y dedicación que tuvieron para bien inculcarme para siempre a seguir superándome día con día, a mis hermanas Bertha, Anaid y Sandra Luz por su motivación y sus consejos.

De igual manera, a los profesores que me impartieron su conocimiento ya que fueron una parte importante en este proyecto.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por la formación académica que me ha permitido cursar en las diferentes etapas de mi vida.

A la Facultad de Agronomía por brindarme los recursos y herramientas para este proyecto.

A la Bióloga Roslava Miranda Salazar y al M. C. Jorge Cantú Vega por la motivación para emprender a realizar este proyecto de maestría

A mi asesor de tesis, el Ph.D. Juan Antonio Vidales Contreras por confiar en mí y brindarme sus memorables consejos, por su apoyo incondicional y su gran ayuda y la paciencia durante el periodo de maestría

A mi asesor externo el Dr. José Rodríguez Rodríguez por su gran disposición y apoyo brindado en este proyecto, por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

A el Arq. Juan Arturo Guevara Soto, por su apoyo, comprensión y darme la oportunidad de poder laborar y realizar este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ABREVIATURAS	XII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hipótesis	3
1.1.1 Hipótesis General	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Objetivos para el Desarrollo Sostenible.....	4
2.2 Biomasa	5
2.3 Digestión Anaeróbica	7
2.4 Producción de Metano.....	9
2.5 Predicción de la Producción de Metano	10
2.6 Bacterias Productoras de Metano	12
2.7 Composición química del estiércol de cerdo y nopal (<i>Opuntia spp.</i>).....	13
2.8 Modelos de predicción de biogás.....	15
3 MATERIALES Y METODOS.....	18
3.1 Producción de biogás.....	18
3.1.1 Contenido de Humedad (<i>H</i>), Sólidos Volátiles (<i>SV</i>), pH y Demanda Química de Oxígeno (<i>DQO</i>).....	19
3.1.2 Simulación de la Cinética de Producción de Biogás	21
3.2 Caracterización del biogás.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1 Producción de Biogás	24
4.2 Contenido de Humedad, Sólidos Volátiles, pH y DQO	25
4.3 Modelación de la cinética de producción de Biogás	26
4.4 Caracterización del biogás.....	40

5. DISCUSIÓN	42
5.1 Producción de Biogás	42
5.2 Modelación de la Cinética de Producción de Biogás	43
5.3 Caracterización de Biogás	45
6. CONCLUSIONES	47
7. BIBLIOGRAFÍA	48
8. ANEXOS	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Factor de producción de biogás por tamaño y tipo de ganado (Martínez, 2007).	9
Cuadro 2.- Parámetros cinéticos observados durante la metanogénesis conducida por dos especies de poblaciones metanogénicas (a. <i>Methanosarcina</i> ; b. <i>Metanosaeta</i>).	13
Cuadro 3.- Composición química del estiércol de cerdo y nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) observada por diferentes investigadores.	14
Cuadro 4.- Modelos de predicción para simular la producción de metano con las diferentes proporciones de estiércol, nopal y agua en los tratamientos de la presente investigación	16
Cuadro 5.- Análisis de varianza para la producción de biogás con cinco tratamientos a dos temperaturas de incubación... ..	24
Cuadro 6.- Volumen promedio (ml) de biogás producido a las temperaturas de incubación y promedios por tratamiento (ml).....	25
Cuadro 7.- Análisis de varianza para el porcentaje de contenido de humedad y solidos observados en las mezclas preparadas inicialmente y al final del periodo de incubación.....	25
Cuadro 8.- Valores promedio de humedad y sólidos volátiles observados en las mezclas preparadas inicialmente y al final del periodo de incubación.....	26
Cuadro 9.- A) análisis de varianza para DQO y B) valores promedio de DQO y pH de las mezclas iniciales y pH de las muestras colectadas de los reactores de incubación al final del experimento	27
Cuadro 10.-Parametros obtenidos y de bondad de ajuste (R^2) para los modelos utilizados en la simulación de los datos observados en T1 con una temperatura de incubación de 30°C.....	29
Cuadro 11.- Producción de biogás y los porcentajes observados para CO ₂ y CH ₄ a las temperaturas de incubación.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.- Comportamiento del consumo de carbón (○), petróleo (●) y gas (◇), en terawatt-hora, desde finales de 1700 y la evolución de las emisiones de CO₂ equivalente. (Δ), giga toneladas de carbón (GTC) por año (<https://ourworldindata.org/co2-emissions>). 4
- Figura 2.- Generación de energía a nivel global procedente de diversos sectores rurales y urbanos (World Bioenergy Association, 2022) 7
- Figura 3.- Representación esquemática de la degradación anaeróbica de diferentes compuestos orgánicos derivados durante la metanogénesis. 11
- Figura 4.- Diagrama de flujo para la realización de la presente investigación en la determinación de la producción de biogás con diferentes proporciones de nopal (*Opuntia ficus-indica*).....18
- Figura 5.- Diagrama de flujo para la realización de la presente investigación en la caracterización de biogás con diferentes proporciones de nopal (*Opuntia ficus-indica*)..... 22
- Figura 6.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T1_30°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards 30
- Figura 7.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T2_30°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 31
- Figura 8.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T3_30°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 32

Figura 9.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T4_30°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 33

Figura 10.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T5_30°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 34

Figura 11.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T1_40°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 35

Figura 12.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T2_40°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 36

Figura 13.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T3_40°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 37

Figura 14.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T4_40°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 38

Figura 15.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T5_40°C. a) BPK; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards. 39

ABREVIATURAS

°C grados centígrados

μ_{\max} tasa de crecimiento máximo

BN biomasa de nopal

BCD biosólidos del canal de drenaje

Ca Calcio

CH₄ Metano

CO₂ Dióxido de Carbono

DQO Demanda Química de Oxígeno

EC estiércol de cerdo

EJ exajulio

et al y otros

FA Facultad de Agronomía

GEI Generación de gases de efecto invernadero

H Humedad

H₂ Dihidrógeno

H₂S Ácido sulfhídrico

HCO₃ Bicarbonato

K Potasio

K_s constante de concentración de saturación media

Mg Magnesio

ml mililitros

msnm metros sobre el nivel del mar

N₂O Óxido Nitroso

NaOH Hidróxido de sodio

NH₃ Amoniaco

ODS Objetivos para el Desarrollo Sostenible

ONU Organización de las Naciones Unidas

P Fósforo

PCG Potencial de Calentamiento Global

pH Potencial de Hidrógeno

ppm Partes por millón

SV Solidos Volátiles

T Tratamiento

ton Toneladas

UANL Universidad Autónoma de Nuevo León

ΔG^ϕ energía libre de Gibbs

RESUMEN

Una alternativa para la generación de energía es la obtención de biogás a partir de residuos que podría ser utilizada de forma *in situ* en zonas rurales con falta de infraestructura; sin embargo, es importante considerar varios factores para determinar su viabilidad. El objetivo de esta investigación fue evaluar la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo (EC) y biomasa de nopal (BN) inoculadas con biosólidos del canal de drenaje (BCD) de una granja porcina. En la primera etapa se evaluó el rendimiento de biogás con cinco tratamientos, T1 100% EC, T2 75% EC y 25% BN; T3, T4 y T5 con 50, 75 y 100% BN, respectivamente, en frascos de 500 ml, se utilizaron 100 ml de biomasa (EC+BN) con 10 ml de BCD para un volumen de trabajo de 110 ml. Las temperaturas de incubación fueron 30° y 40° C durante todo el periodo de estudio, obteniendo más de 500 ml de biogás. Adicionalmente se realizaron análisis de sólidos volátiles (SV), pH, humedad y análisis cromatográfico de las muestras de gas colectadas. Las cantidades de biogás observadas fueron simuladas con modelos Exponenciales y Logísticos. Para la segunda etapa se consideraron los mismos tratamientos, pero con un volumen de 200 ml de trabajo con una relación BCD/biomasa de 0.5, agregando 50 ml de agua destilada para completar los 200 ml mencionados, las temperaturas de incubación fueron 35° y 40°C. Los tiempos de monitoreo se realizaron cada 24 h durante todo el periodo de incubación. La máxima producción de metano fue del 15.58% a 35°C en T1, 100% EC. Mientras que el T5 con 100% BN alcanzó 10.54% a esta temperatura de incubación, probablemente esta condición se debió al bajo pH de la BN.

Palabras clave: Biogás, biomasa, incubación

ABSTRACT

An alternative for energy generation is obtaining biogas from waste, which could be used *on-site* in rural areas with a lack of infrastructure; however, it is important to consider several factors to determine its viability. The objective of this research was to evaluate biogas production from pig manure (PM) and cactus biomass (PB) inoculated with sludge from a pig farm wastewater drainage channel (BCD). In the first stage, biogas emissions was evaluated with five treatments, T1 100% PM, T2 75% PM and 25% PM; T3, T4 and T5 with 50, 75 and 100% PM, respectively, in 500-ml flasks with 100 ml of biomass (PM+PB) and 10 ml of PM for a working volume of 110 ml. The incubation temperatures were 30° and 40° C throughout the study, obtaining a biogas production greater than 500 ml. Additionally, volatile solids (VS), pH and humidity analyses were performed, as well as chromatographic analysis of the collected gas samples. The observed biogas volumes were simulated with Exponential and Logistic models. For the second stage, the same treatments were considered, but with a 200-ml working volume with 0.5 BCD/biomass ratio, adding 50 ml of distilled water to complete the working volume. The incubation temperatures were 35° and 40°C with 24 h monitoring period. The highest methane production was 15.58% at 35°C for T1, 100% PM; whereas for T5 with 100% PB reached 10.54% at that incubation temperature, probably due to the low pH of PB.

Keywords: Biogás, biomass, incubation

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global el cambio climático es un tema de gran preocupación que amenaza las formas de vida sobre la tierra. Actualmente, la búsqueda de energías asequibles y no contaminantes es un enfoque dirigido a disminuir el consumo de combustibles fósiles, preservar los recursos naturales y sobre todo una fuente de energía que disminuya la generación de gases de efecto invernadero (GEI) Weiland (2006), utilizando la biomasa procedente de la fracción biodegradable de desechos orgánicos. Un enfoque actual es la producción de biogás que puede contener hasta un 60% de metano (CH_4) y otros gases en diferentes porcentajes, (Gutiérrez García *et al.*, 2001). El CH_4 es un combustible producto de la descomposición de la materia orgánica mediante un proceso bioquímico llevado a cabo por un conjunto de bacterias conocidas como metanogénicas capaces de transformar el acetato o H_2 y CO_2 a CH_4 (Van Lier *et al.*, 2008). Estas poblaciones bacteriales pueden residir artificialmente en recintos o tanques cerrados de flujo discontinuo, semicontinuo o continuo conocidos como biodigestores, con un tiempo de residencia suficiente, bajo condiciones mesofílicas o termofílicas para la descomposición y producción del biogás y fertilizante orgánico (Pedraza *et al.*, 2002; Ramón *et al.*, 2006). Comúnmente el biogás procede de la digestión de estiércol de ganado porcino (Xu *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2022, Monch-Tegeder *et al.*, 2014; Ni *et al.*, 2017; Alam *et al.*, 2020) o muy frecuentemente mediante la co-digestión anaeróbica de diferentes tipos de biomasa (Li *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013); por ejemplo, *Opuntia ficus-indica* combinada con desechos de rastro (Mota Panizio *et al.*, 2019), estiércol bovino (Elías Jigar *et al.*, 2011; Comparetti *et al.*, 2017), estiércol de cerdo y recorte de pasto (Matheri *et al.*, 2016), entre otros (Treviño-Amador *et al.*, 2013; Rivera-Hernández *et al.*, 2022). Para la evaluación de la producción de biogás frecuentemente se ha utilizado el método de volumen desplazado de agua o una solución alcalina (Burboa-Charis y Álvarez, 2020; Pham *et al.*, 2013) en donde el volumen de líquido desplazado representa el volumen de gas producido que puede ser simulado mediante modelos matemáticos que estimen los parámetros del comportamiento cinético de la digestión (Sales *et al.*, 2021).

En las zonas rurales de México los residuos de origen animal son una potencial fuente de contaminación y daño a salud pública debido a la alta marginación; ausencia o escasas de abastecimiento de agua potable, y de servicios de saneamiento y energéticos (CONEVAL, 2018). Específicamente, en las zonas rurales de Nuevo León, con escasa precipitación anual, un recurso natural presente es el nopal (*Opuntia ficus- indica*) con concentraciones considerables de nutrientes; por ejemplo, Ca, Mg, P, K y metales pesados a nivel traza. También es frecuente la crianza de cerdos en traspatio que en forma similar al nopal aportan diferentes nutrientes (Barreda *et al.*, 2022; y Chastainer *et al.*, 2012) al suelo por lo que la cogestión de ambos puede ser una fuente de bioenergía.

En la presente investigación se evaluó la producción de biogás a partir de diferentes proporciones de EC, BN y agua; inoculadas con BCD de la granja porcina de la Facultad de Agronomía UANL ubicada en Marín N.L. de donde se obtuvieron las muestras. Lo anterior, buscando posibles soluciones para el abastecimiento de energía calorífica para su utilización en la preparación de alimentos en las zonas marginadas del sur del estado de Nuevo León; además de buscar tener una alternativa para la generación de energías renovables donde el EC y BN son recursos fácilmente accesibles. No obstante, el presente trabajo de investigación se desarrolló bajo condiciones de laboratorio, bajo temperaturas controladas como un trabajo exploratorio de la producción de CH₄ para superar las limitaciones que se pueden tener bajo condiciones de campo; como, por ejemplo, el volumen de la unidad experimental, la medición del volumen de biogás producido, la variación diaria de temperatura, los diferentes tipos de biodigestores, la inversión inicial y los costos de mantenimiento.

1.1 Hipótesis

1.1.1 Hipótesis General

La producción de biogás y su composición depende de las proporciones de estiércol de cerdo, biomasa de nopal, temperatura y tiempo de digestión cuyo volumen de producción puede modelarse mediante ecuaciones exponenciales y logísticas.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la producción de biogás a partir de diferentes proporciones de EC y BN a diferentes temperaturas bajo condiciones de laboratorio.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- a) Evaluar la producción del biogás a nivel de laboratorio en mezclas con diferentes proporciones de estiércol de cerdo y *Opuntia ficus-indica*, así como su comportamiento en el tiempo de digestión.
- b) Simular el comportamiento de la producción de biogás a diferentes temperaturas utilizando modelos exponenciales y logísticos
- c) Caracterizar los principales componentes presentes en el biogás producido a diferentes temperaturas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Objetivos para el Desarrollo Sostenible

Ambiental, Social y Climatológicamente el cambio climático es un tema de profunda preocupación ya que amenaza a las formas de vida que existen actualmente. A corto plazo, impacta negativamente a los Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS) declarados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>). Entre ellos, energía asequible y no contaminante que promueva la generación y uso de energías renovables y disminuya el consumo de combustibles fósiles. La Figura 1, muestra el comportamiento en el consumo de combustibles fósiles desde la revolución industrial hasta la actualidad y la emisión de CO₂ equivalente que se calcula multiplicando la masa de un gas por su potencial de calentamiento global (PCG) asociado al cambio climático; por ejemplo, el PCG de CH₄ es 28, es decir una tonelada de este gas equivaldría a 28 ton de CO₂, es decir, el calentamiento global de CO₂ es 28 veces menor al del CH₄.

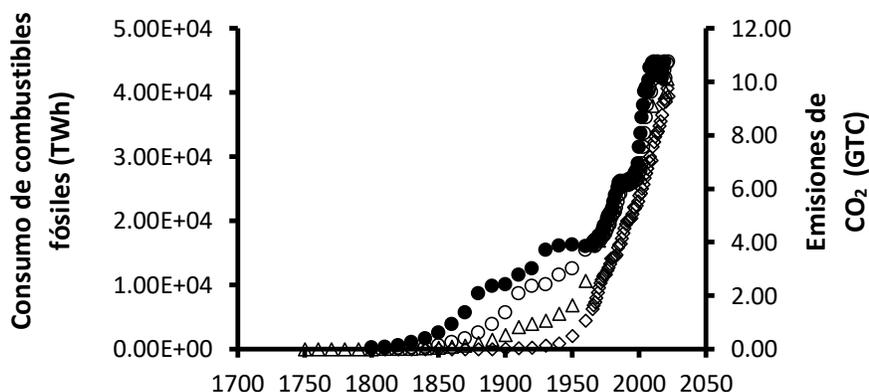


Figura 1.- Comportamiento del consumo de carbón (○), petróleo (●) y gas (◇), en terawatt-hora, desde finales de 1700 y la evolución de las emisiones de CO₂ equivalente. (Δ), Giga toneladas de carbón (GTC) por año (<https://ourworldindata.org/co2-emissions>).

Como es posible observar el consumo de combustibles fósiles presenta una tendencia ascendente y por consecuencia los gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, entre los más importantes) sigue un patrón similar, alcanzando en 2022 las 420 ppm de media mensual en la atmosfera. Por esta razón, Acción por el Clima (Objetivo 13 de los ODS) implementa estrategias para reducir la emisión de GEI y alcanzar a finales del presente siglo menos de 2 °C de incremento en la temperatura global con relación a la época preindustrial. Por lo anterior, las acciones de mitigación para reducir la emisión de GEI y las estrategias de adaptación para asimilar el cambio climático a corto plazo (Solomon *et al.*, 2007; Venkata *et al.*, 2012; Al-Ghussain, 2018) han sido motivo de diversas investigaciones (Gamula *et al.*, 2013; Efe *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2015; Hammad *et al.*, 2018). De esta manera se atienden las principales fuentes de su emisión como lo son la generación de energía eléctrica, la agricultura y los desechos orgánicos para que así se transite al uso de energías renovables, a disminuir el consumo de combustibles fósiles, a mejorar el manejo de estiércol procedentes de la ganadería, a incrementar la reutilización de desechos orgánicos y a promover la captura de CH₄ y CO₂ (Al-Ghussain, 2018).

2.2 Biomasa

La biomasa se define como aquella fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agropecuarias, la silvicultura y el sector industrial (Aysu y Küçük, 2014; Damartzis y Zabaniotou, 2011; Wei *et al.*, 2006). Se le considera una fuente de energía renovable mediante su conversión termoquímica. Su aprovechamiento eliminaría residuos y desechos de diferentes sectores de la actividad económica reduciendo así la emisión de GEI.

Existen varios tipos de biomasa, en la Figura 2 se observan los diferentes niveles de producción y el potencial en producción de energía que puede ser obtenido al ser considerados como recursos energéticos. Estos recursos se pueden dividir en biomasa natural y residual. La biomasa natural se produce en ecosistemas naturales y es una de las principales fuentes energéticas en los países subdesarrollados. Su

potencial global en biomasa sólida puede alcanzar una producción de 49.3×10^{18} J (49.3 EJ). Su uso en forma intensiva no es compatible con la protección del ambiente ya que su sobre explotación induce desertificación haciéndola económicamente inviable. La biomasa residual proviene de los bosques, actividades agropecuarias y residuos industriales y urbanos. Los residuos forestales actualmente son muy poco explotados se considera que del 100% solo el 20% es aprovechable para la generación de energía (Corona, 2007). Los residuos agropecuarios son los derivados de la agricultura y la cría de animales; por ejemplo, la cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, pulpa de frutas y vegetales, como también el estiércol de animales de granja. Por otra parte, los residuos industriales, con un potencial de 1.19 EJ, son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos; por ejemplo, los que provienen de la industria de los alimentos que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Otro tipo de desechos son los que se producen en los centros urbanos, desechos municipales, los cuales generan una gran cantidad de biomasa como lo son residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras con un potencial de energía de 1.47 EJ. La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por los inadecuados métodos de disposición o confinamiento. A nivel global la producción de biogás y biocombustibles representan solo una fracción mínima de los 15 ZJ (15×10^{21} J) obtenidos, aproximadamente, del petróleo que se consume actualmente (Figura 2).

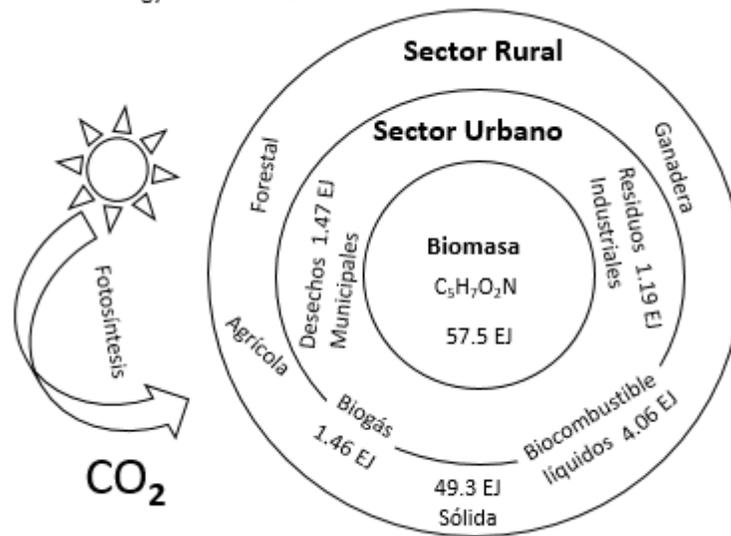


Figura 2.- Generación de energía a nivel global procedente de diversos sectores rurales y urbanos (World Bioenergy Association, 2022)

2.3 Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica de desechos orgánicos agrícolas (Amon *et al.*, 2006), industriales (Xu *et al.*, 2019) y urbanos (Wang *et al.*, 2013) ha sido usada por mucho tiempo como una manera de lograr su estabilización, preservar los cuerpos de agua y proteger la salud pública (Nelson and Lam, 2002). Sin embargo, actualmente su enfoque se ha dirigido a disminuir el consumo de combustibles fósiles, preservar los recursos naturales y sobre todo como una fuente de energía que disminuya la generación de GEI (Weiland, 2006). Lo anterior ha dado la oportunidad de buscar diferentes maneras de generar biogás para la producción de energía, muy frecuentemente mediante la co-digestión de diferentes sustratos (Li *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013); sin embargo, los estiércoles de ganado, entre ellos el porcino (Xu *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2022), son comúnmente utilizados (Monch-Tegeder *et al.*, 2014; Ni *et al.*, 2017; Alam *et al.*, 2020). Los resultados de este interés global por la bioenergía se ven reflejados en el número de plantas instaladas a nivel global. Un ejemplo de este crecimiento es el número de plantas productoras de biogás en Alemania que pasó de 100 a 3000 plantas productoras en el periodo de 1990 a

2004; contribuyendo a los $18.43 \times 10^6 \text{ m}^3$ de biogás producidos en Europa con el 12.1 % en 2015, mientras que Suiza aportó el 23.2% en el mismo año. Sin embargo, la mayor producción se presenta en Estados Unidos de América con 17,400 plantas de Biogás instaladas (Scarlat *et al.*, 2018). En México las principales fuentes de energía son combustibles de origen fósil; por ejemplo, el petróleo contribuye con 62.4%, gas natural 19.7%, carbón 4.3% y condensados 0.8% para un total de 87.2%, un 2.4% es proporcionado de energía nuclear. Por otra parte, las energías renovables representan el 10.4% entre ellas tenemos la biomasa con 5.7%, energía solar y eólica 2.8%, hidroenergía 1.8% y el biogás 0.1% SENER (2018), fundamentalmente procedente de rellenos sanitarios.

En las zonas rurales del país existe una problemática con los residuos de origen animal ya que generan una gran contaminación y problemas en la salud y no se cuenta con tratamientos que puedan mitigar o reducir el efecto que causan estos desechos, principalmente en regiones de alta marginación carentes de servicios energéticos, las condiciones en que se encuentran carecen de infraestructura e inversión, lo cual conlleva a tener un gran problema de contaminación ambiental y deforestación, ya que en estos lugares la quema de leña se utiliza como energía calorífica para cocción de los alimentos (CONEVAL, 2018). El Cuadro 1 presenta las cantidades de estiércol que produce el ganado bovino, porcino y avícola, en las diferentes etapas de su crecimiento y la producción de biogás que se puede llegar a obtener con dichos residuos, siendo el ganado bovino y porcino los que mayor cantidad de excreta producen y por lo tanto generan mayor cantidad de biogás.

Cuadro 1.- Factor de producción de biogás por tamaño y tipo de ganado (Martínez, 2007).

Especie	Tamaño	Cantidad de excreta (kg d⁻¹)	Producción de Biogás (m³ animal⁻¹ día⁻¹)
Bovino	Ternero	4.00	0.16
	Pequeño	8.00	0.32
	Mediano	10.00	0.40
	Grande	15.00	0.60
Porcino	Pequeño	1.00	0.07
	Mediano	1.50	0.10
	Grande	2.00	0.14
Avícola	Pequeño	0.05	0.003
	Mediano	0.10	0.006
	Grande	0.15	0.009

2.4 Producción de Metano

La digestión anaerobia es un proceso biológico en donde los compuestos químicos orgánicos son convertidos en biogás por un conjunto de bacterias que son sensibles al oxígeno. Este proceso ocurre cuando la materia orgánica está disponible y el oxígeno ausente como es el caso del estómago de rumiantes, rellenos sanitarios o la capa de sedimentos en el fondo de lagunas de oxidación, entre otros.

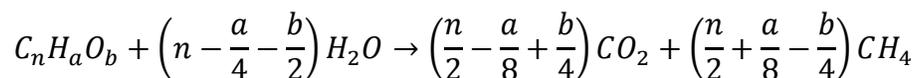
Lo anterior ocurre a través de la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, como se muestra en la Figura 3. En la primera de ellas los compuestos orgánicos complejos son transformados en otros más simples y solubles debido a las exoenzimas producidas por las bacterias anaeróbicas que penetran su pared celular. Una vez dentro de la célula, estos compuestos son transformados a estructuras más simples como ácidos volátiles, alcoholes, CO₂, H₂, H₂S y NH₃ para posteriormente ser excretados. En la acetogénesis, los compuestos

excretados son convertidos a acetato, H₂ y CO₂ que, durante la metanogénesis, el acetato y el H₂ reaccionan con HCO₃, formato o metanol para formar metano. Al igual que en las dos últimas etapas también se forma biomasa celular. A través de este proceso bioquímico la etapa limitante es la hidrólisis, pero no por la ausencia de enzimas, si no por la falta de disponibilidad o área superficial y la complejidad de la estructura del sustrato (van Lier *et al.*, 2008). Es importante hacer notar que una vez que la alcalinidad es consumida ocurre la disminución del pH llegando a inhibir la metanogénesis por la acumulación de ácidos grasos volátiles.

Estos procesos pueden ocurrir artificialmente en biodigestores que son recintos o tanques cerrados de flujo discontinuo, semicontinuo o continuo donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo (tiempo de residencia) para lograr su descomposición y producción de biogás además de fertilizante orgánico (Pedraza *et al.*, 2002; Ramón *et al.*, 2006). La elección del modelo de reactor varía de acuerdo con su finalidad y el presupuesto de los usuarios. Por ejemplo, puede utilizarse como equipo de eliminación de desechos animales en una granja, herramienta de saneamiento de una comunidad o, como ya se comentó, como generador de combustible para su uso *in situ*. El tiempo requerido para que las bacterias digieran la materia orgánica está directamente relacionado con la temperatura. En ambientes que promedian 30 °C, se necesitan 10 días; 5 días a 20 °C y 55 días a 10 °C. Por esta razón, el tamaño de la cámara del reactor varía de acuerdo con el clima del lugar.

2.5 Predicción de la Producción de Metano

Una ecuación para evaluar la producción de metano a partir de la transformación de materia orgánica es la siguiente:



Dónde: n, a y b son el número de átomos en el compuesto químico

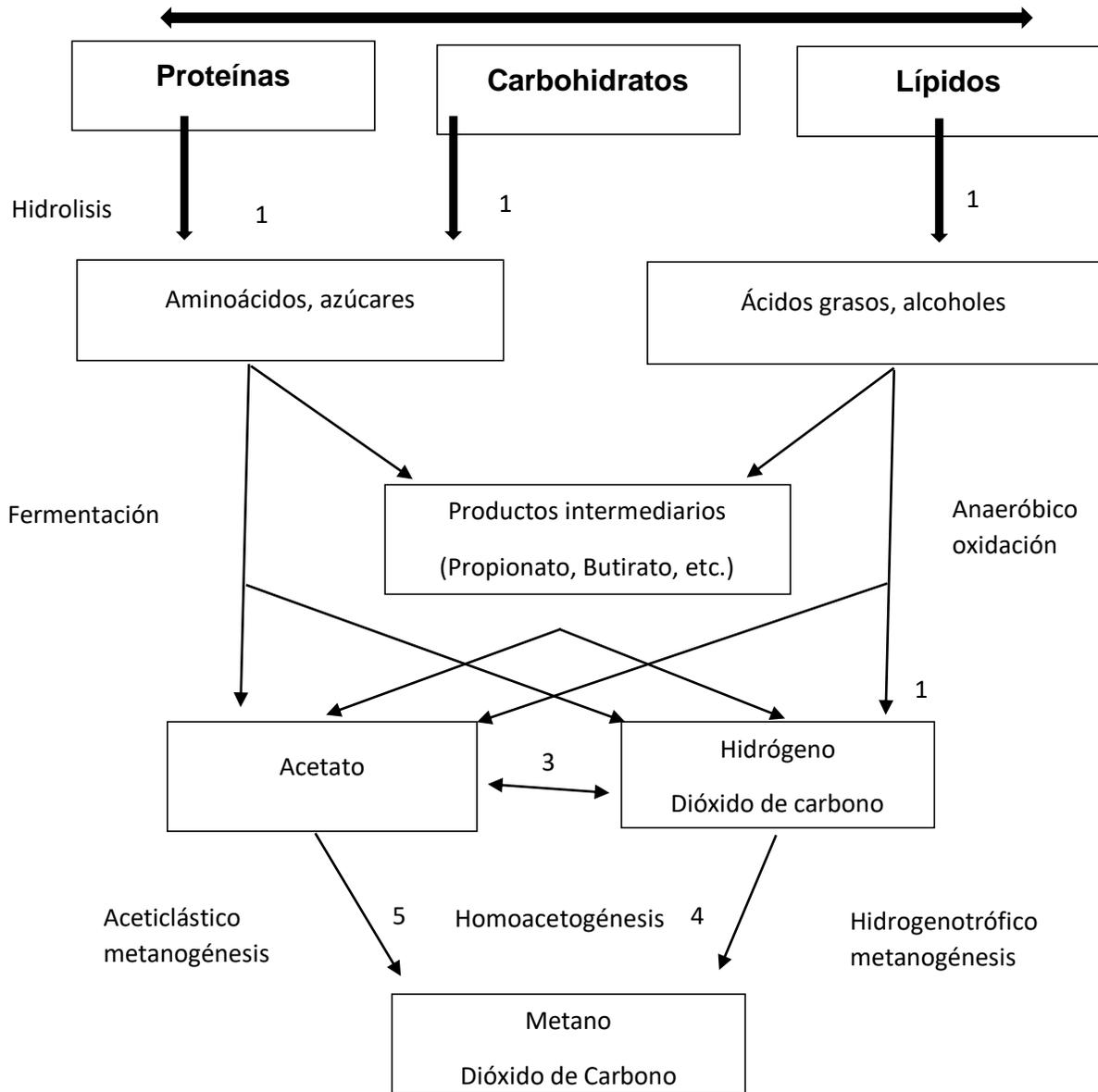
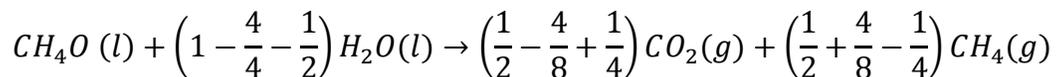
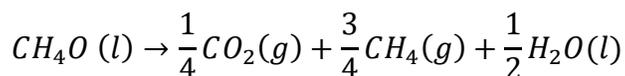


Figura 3.- Representación esquemática de la degradación anaeróbica de diferentes compuestos orgánicos derivados durante la metanogénesis.

Por ejemplo, para metanol la ecuación estaría representada de la siguiente manera:



Proporcionando la siguiente reacción química:



Por lo que la fracción molar de metano en la fase gaseosa sería 75%. Es decir, un mol de metanol podría proporcionar 0.75 moles de metano. Para Ácido Acético ($C_2H_4O_2$) la reacción sería:



La producción de metano sería el 50% y para ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) 12.5%. De estos ejemplos podemos observar que el estado de oxidación del carbono en metano es -4, en ácido acético cero y ácido oxálico 3 por lo que a mayor número de oxidación del carbono menor la producción de metano (Van Lier, 2020). La fórmula química molecular para la biomasa citada frecuentemente en investigaciones es $C_5H_7O_2N$ (Weissbrodt *et al.*, 2020), con un estado de oxidación del carbono de cero, teóricamente produciría, de acuerdo con la ecuación de Buswell (Achinas y Willem, 2016), CH_4 y CO_2 en partes iguales, es decir 50% para cada uno. Sin embargo, la presencia de aceptores de electrones inorgánicos como NO_3 , NO_2 , SO_4 y otros, reducirían considerablemente la producción de metano al competir con el carbono por los iones de hidrogeno; por ejemplo, $10H + 2H^+ + 2NO_3^- \rightarrow N_2 + 6H_2O$ para el caso de nitratos.

2.6 Bacterias Productoras de Metano

Son un grupo muy específico en relación al sustrato que requieren para obtener energía. Pero en forma general se clasifican en acetoclasticas que utilizan el acetato para producir metano, se estima que el 70% del metano producido proviene del acetato, y las hidrogenotróficas que lo producen a partir de H_2 y CO_2 . Las acetoclasticas consisten en dos grupos: *Methanosarcina spp.*, que son un grupo de células esféricas (cocos) que se agrupan en racimos. El sustrato que utilizan es relativamente diverso ya que pueden convertir a metano el acetato, metanol, formato, metilaminas y H_2-CO_2 . Por el contrario, el otro grupo de acetogenicas

(*Methanosaetas*) son bacterias filamentosas que puede producir metano a partir de acetato solamente. (Van Lier *et al.*, 2008). El Cuadro 2 presenta los valores encontrados de energía libre de Gibbs (ΔG^Φ) y la constante de concentración de saturación media (K_s) donde se puede observar que las *Methanosarcina* presenta similitud en ΔG^Φ , una menor tasa de crecimiento máximo (μ_{max}) y de K_s lo que aparentemente indica que la presencia de *Methanosaeta* es más favorable para la producción de metano en los sistemas de digestión anaeróbica.

Cuadro 2.-Parámetros cinéticos observados durante la metanogénesis conducida por dos especies de poblaciones metanogénicas (a. *Methanosarcina*; b. *Methanosaeta*).

	Reacción	ΔG° (kJ/mol)	μ_{max} (1/d)	T_d (d)	K_s (mgCOD/L)
Metanogénesis acetogénica	$CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$	-31	0.12 ^a	5.8 ^a	30 ^a
Metanogénesis hidrogenotrófica	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-131	0.71 ^b	1.0 ^b	300 ^b
			2.85	0.2	0.06

Diversos estudios han evaluado la producción de metano mediante el volumen desplazado de agua en un recipiente (Bakraoui *et al.*, 2020; Hallaji *et al.*, 2019; Chulalaksananukul *et al.*, 2012) o una solución alcalina (Burboa-Charis y Álvarez, 2020; Pham *et al.*, 2013), en este último caso, se asume que el CO_2 es capturado por una solución de NaOH por lo que el volumen que se desplaza corresponde al volumen de metano generado por el digestor.

2.7 Composición química del estiércol de cerdo y nopal (*Opuntia spp.*)

Los valores de la composición química del estiércol de cerdo y del nopal observados por diferentes autores aparecen en el Cuadro 3. Como es posible observar los porcentajes de humedad a partir de los valores indicados por Barreda *et al.* (2022) y Chastainer *et al.* (2012) son del 87.41 y 90.8%, respectivamente. Con estos

niveles de humedad el estiércol de cerdo presenta concentraciones de Ca, Mg, P, K y de nitrógeno total de 0.33 a 2.73 %. Es importante mencionar que los valores obtenidos por Shepard *et al.* (2018) son en base a materia seca por lo que las concentraciones de estos compuestos se incrementarían considerablemente ya que el volumen de humedad es de aproximadamente 90% (Barreda *et al.*, 2022 y Chastainer *et al.*, 2023). Es decir, si la concentración de calcio es de 27,800 mg/kg en base seca en base humada correspondería a 2780 mg/kg. En relación al nopal, su composición es muy variable, pero en general es posible mencionar que las mayores concentraciones en minerales las aportan Ca, K, P y Mg. Las fibras insolubles son muy variables también, por ejemplo, Pérez Méndez *et al.* (2015) observó 2.7% mientras que otros investigadores han detectado 17.6% (Tibe *et al.*, 2008). Por otra parte, Huang *et al.* (2017) señala que las concentraciones de $C, N, NH_4^+ - N, NO_3^- - N$ fueron 374.6, 46.8, 0.09 y 4.9 g kg⁻¹, respectivamente, de estiércol de cerdo, con una relación C:N de 8 y un pH de 6.63.

Cuadro 3.- Composición química del estiércol de cerdo y nopal (*Opuntia ficus-indica*) observada por diferentes investigadores.

Análisis	Estiércol de Cerdo				<i>Opuntia ficus indica</i>	
	Barreda del Campo <i>etal.</i> , (2022)	Chastain <i>et al.</i> (2023)	Regueiro <i>et al.</i> (2012)	Shepard S.C. (2018) *	Méndez Pérez <i>et al.</i> (2015)	Guzmán Loyza <i>et al.</i> , (2007)
Humedad (%)	87.41±8.22	90.8			94±0.41	94.3
Cenizas (%)	1.58±0.23				1.08±0.10	1.6
Materia Orgánica (%)	11.09±1.98					
Fibra Insoluble (%)					2.7±0.41	1.06
Nitrógeno Kjeldahl (%)	2.73±0.06	0.5	0.33±0.06	13.7		
pH			6.9±0.2		4.64±0.10	
C/N	12.36±1.26					
Metales (mg/kg)						
Ca	751.47	4115.44		26600-27800	1770±310	3390
Mg	307.94	782.73		12100-16700	941±283	
Fe	100.29			2130-2540	1.3±0.49	32.2
P	405.88	3876.28		18000-27000	163.80±64.9	
K	588.82	3484.41		57000-90500	2240±740	1450

Al	181.17					
Si	136.17					
As	7.64					
B	7.05			53-73		
Ba	11.17			38-55		
Cu	11.76	15.14		483-880	0.63±0.31	
Mn	5.58	23.98		379-390	7.80±2.41	
Ni	2.35			7-13		
Sn	0.29			0.3-7.1		
Sr	9.70			69-81		
Zn	21.47	61.89		955-1190	3.68±0.028	
S		946.85				
Na		833.22		25900-26600	17.1±9.9	183
Densidad (kg/L)			1			
ST			17.3±4.5			
SV			11.7			
COD tot			29±0.12			
Proteínas (%)			1.1±0.2		0.30±0.07	0.48
Lípidos (%)			1.5±0.3			0.11
Carbohidratos (%)			9.2±3.8		4.11±0.74*	2.43
COD/N			8.9±1.3			

* En base a materia seca

2.8 Modelos de predicción de biogás

Existe un consenso general que los modelos matemáticos ayudan en la estimación de los parámetros del comportamiento cinético de la digestión anaeróbica (Sales *et al.*, 2021). En forma general los modelos utilizados para la simulación de producción de biogás o CH₄ se pueden clasificar en Exponenciales y Logísticos, como se presenta en el Cuadro, 4 de acuerdo a la curva que describe gráficamente su función de tiempo-producción de biogás. Los parámetros simulados por diferentes investigadores (Van Lier *et al.*, 2008) han sido por ejemplo la tasa máxima de crecimiento, la constante de saturación media, el tiempo de aclimatación e índices de forma de esta función entre otros parámetros. Abu-Ressh (2013) observó en sus

estudios de digestión de suero lácteo, a una temperatura de incubación de 30 a 40°C y un pH de 6 a 7, que después de 28 días la temperatura de 36°C y un pH de 6.5 fueron las condiciones que proporcionaron mejores rendimientos de biogás y el mejor modelo para predecir la cinética de la digestión fue la ecuación modificada de Gompertz. En otro estudio conducido por Turkdogan-Aydinol *et al.* (2010) sobre la modelación del comportamiento inicial de un reactor anaeróbico de cama de lodos a 20° C con 24, 12 y 5 h de retención y cargas orgánicas entre 0.57 a 11.78 kg m⁻³ d⁻¹ se encontró que el modelo con mejor ajuste ($r^2=0.9729$) fue la ecuación modificada de Stover-Kinkannon. Por otra parte, Roberts *et al.* (2023) al analizar la simulación de la cinética de producción de CH₄ sugiere que la mejor predicción fue obtenida con las ecuaciones de Gompertz y la ecuación de primer orden.

Cuadro 4.- Modelos de predicción para simular la producción de biogás con las diferentes proporciones de estiércol, nopal y agua en los tratamientos de la presente investigación.

Modelo Cinético	Ecuación del Modelo
Modelos Exponenciales	
Exponencial de Primer Orden	$P_t = P[1 - \exp(-kt)]$
Fitzhugh	$P_t = P[1 - \exp(-kt)^n]$
Cone	$P_t = \frac{P}{1 + (kt)^{-n}}$
BPK	$P_t = P \left\{ 1 - \exp \left[(m - 1) \left(\frac{t}{t_0} \right)^{1/m} \right] \right\}$
Monomolecular	$P_t = P[1 - \exp(-k(t - \gamma))]$
Trasferencia	$P_t = P \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\mu_m(t - \gamma)}{P} \right] \right\}$
Modelos Logísticos	

Gompertz Modificado	$P_t = P * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m * e}{P} (\gamma - t) + 1 \right] \right\}$
Logístico	$P_t = \frac{P}{1 + \exp \left[\frac{4\mu_m(\gamma - t)}{P} \right] + 2}$
Richards	$P_t = P \left\{ 1 + v * \exp(1 + v) * \exp \left[\frac{\mu_m}{P} * (1 + v) \left(1 + \frac{1}{v} \right) (\gamma - t) \right] \right\}^{(-1/v)}$

Donde: P_t biogás acumulado durante el periodo de incubación (ml). P volumen de metano generado durante el experimento (ml). k constante de reacción de la producción de biogás (d^{-1}). t tiempo de digestión (d). n constante de forma (adimensional). m constante de forma del modelo BPK (adimensional). e numero de Euler. t_0 tiempo cuando la producción de biogás es máxima (d). γ tiempo de aclimatación (d). μ_m máxima tasa de producción de biogás ($ml d^{-1}$). v Constante de Richards.

MATERIALES Y METODOS.

3.1 Producción de biogás.

En la primera etapa de la presente investigación, la cantidad de biogás producido se evaluó a 30 y 40 °C con 5 tratamientos por triplicado es decir con un factorial de 2x5x3. El diagrama de flujo esta descrito en la Figura 4. Brevemente, el estiércol fue colectado directamente de los corrales de engorda porcina de la FAUANL ubicados en Marín N.L., de donde también se obtuvieron los cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*). Los procedimientos experimentales fueron realizados en los Laboratorios de Remediación Ambiental y Análisis de Agua, Suelos y Plantas y del de Biotecnología Microbiana de la FA-UANL, General Escobedo N.L.

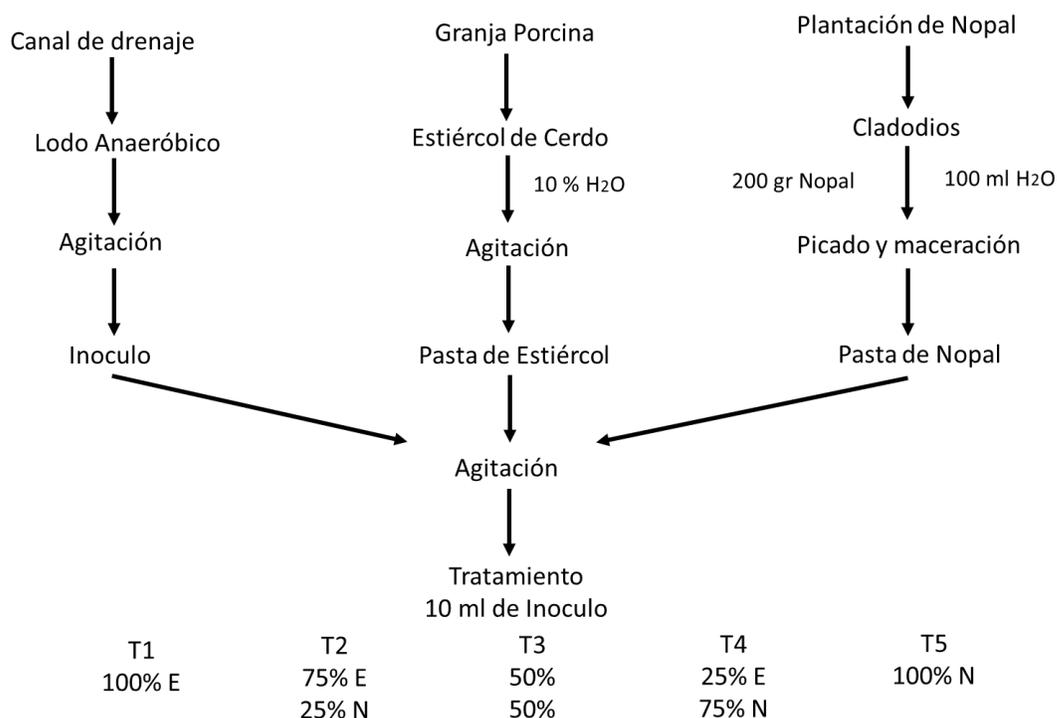


Figura 4.- Diagrama de flujo para la realización de la presente investigación en la determinación de la producción de biogás con diferentes proporciones de nopal (*Opuntia ficus-indica*).

Para los tratamientos se maceró el cladodio de nopal agregando 100 ml de agua destilada a 200 g de cladodio picado hasta obtener una textura de pasta. El inóculo utilizado, con una apariencia oscura y presencia de abundantes burbujas de gas, se recolectó del canal de drenaje de los corrales de engorda. Las combinaciones para cada uno de los tratamientos, preparadas momentos después de la recolección de los componentes, fueron las siguientes: T1 100% EC, T2 75% EC y 25% BN; T3, T4 y T5 con 50, 75 y 100% BN, respectivamente en frascos de vidrio de 500 ml. En cada tratamiento se utilizaron 100 ml de biomasa (EC+BN) con 10% de BCD para un volumen de total de 110 ml. Cada tratamiento se preparó individualmente, con un volumen suficiente para las tres repeticiones, mezclando con un agitador los ingredientes hasta obtener una pasta homogénea. Una vez que cada tratamiento era preparado se aplicaba helio antes de cerrar cada unidad experimental con tapón de plástico y un precinto preparado con la tapa metálica del frasco de 500 ml. Los tiempos de monitoreo de producción de biogás, utilizando el método de volumen desplazado de una solución NaOH al 2%, fueron de 24 h. Los valores de producción acumulada de biogás para cada tratamiento fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA con dos variables independientes (factores) y una dependiente, así como comparación de medias, Tukey, en Minitab 17 (Minitab, Software for Statistical Analysis)

3.1.1 Contenido de Humedad (*H*), Sólidos Volátiles (*SV*), pH y Demanda Química de Oxígeno (*DQO*).

Los análisis de contenido de *H*, *SV*, pH y *DQO* de las muestras colectadas fueron realizados adaptando los métodos estándar descritos en Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Agua Residual (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, su nombre en inglés). Para la determinación por triplicado de *H* una porción de la muestra colectada de aproximadamente 1 g se colocó en un crisol de porcelana, previamente pesado, para ser llevado a la estufa a 105°C por 24 h. La siguiente relación se utilizó para determinar el porcentaje de humedad en base al peso de la muestra preparada para cada tratamiento:

$$H(\%) = 1 - \frac{(W_a - W_c) \times 100}{W_b - W_c}$$

Donde H es porcentaje de humedad en la muestra (%), W_a peso de la muestra y crisol después 24 h en la estufa a 105°C (g), W_c peso del crisol (g) y W_b peso de muestra y crisol antes del secado en la estufa W_c (g).

Para la determinación de SV la siguiente expresión fue utilizada:

$$SV = \frac{(W_a - W_m) \times 100}{W_b - W_c}$$

Donde W_m peso del crisol (g) con muestra después de incineración 550°C durante 15 min. Los datos observados para contenido de H y SV fueron analizados estadísticamente mediante ANOVA y comparación de medias (Tukey) en Minitab.

La demanda química de oxígeno se determinó de acuerdo con los métodos establecidos en Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater por su nombre en inglés), APHA/AWWA/WPF, 2005. Brevemente, la curva estándar se preparó con Biftalato de Potasio ($C_8H_5KO_4$), secado previamente a 105° C durante 24. Las muestras preparadas se digirieron por 2 h en un digestor Hanna para finalmente leer la absorbancia en un espectrofotómetro (ThermoSpectronic, Genesys 8) a 600 nm y relacionarlo con la concentración de DQO aportada por el Biftalato. Para la determinación de la DQO de los tratamientos (por triplicado) se tomaron alícuotas de 2.5 ml de diluciones 1/1000 de cada mezcla experimental (T1 a T5) para su digestión y lectura en el espectrofotómetro a 600 nm. La DQO se determinó comparando estas lecturas con la curva estándar, preparada anteriormente. Los datos observados se analizaron mediante ANOVA de un factor y comparación de medias (Tukey) entre tratamientos. El pH se determinó con una muestra por tratamiento bajo las tres condiciones experimentales (mezcla inicial y al final del periodo de incubación a 30 y 40°C).

3.1.2 Simulación de la Cinética de Producción de Biogás

Las mediciones promedio de biogás acumulado determinadas diariamente fueron simuladas utilizando los modelos que aparecen en el Cuadro 4 en un factorial de $2 \times 5 \times 9$, es decir dos temperaturas, cinco valores promedio de volumen de biogás producido y nueve ecuaciones de modelación. La determinación de los parámetros cinéticos de los modelos y la bondad de ajuste a los datos observados para cada uno de los tratamientos fue determinada utilizando Solver (Microsoft Excel 2016). Los coeficientes de determinación para la regresión lineal ($y = a + bx$) entre los valores observados y los calculados usando los modelos exponenciales fueron sometidos a una evaluación del nivel de significancia estadística ($p=0.05$) en Excel.

3.2 Caracterización del biogás.

En base a los resultados de la producción de biogás en esta etapa se decidió modificar el volumen de trabajo a 200 ml, utilizar 50 ml de agua y 50 ml de inóculo. El procedimiento que se siguió se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 5. Teniendo una relación Inóculo/biomasa del 0.5 y agregando 50 ml de agua destilada, las proporciones de EC y BN se mantuvieron como en la primera etapa para los cinco tratamientos.

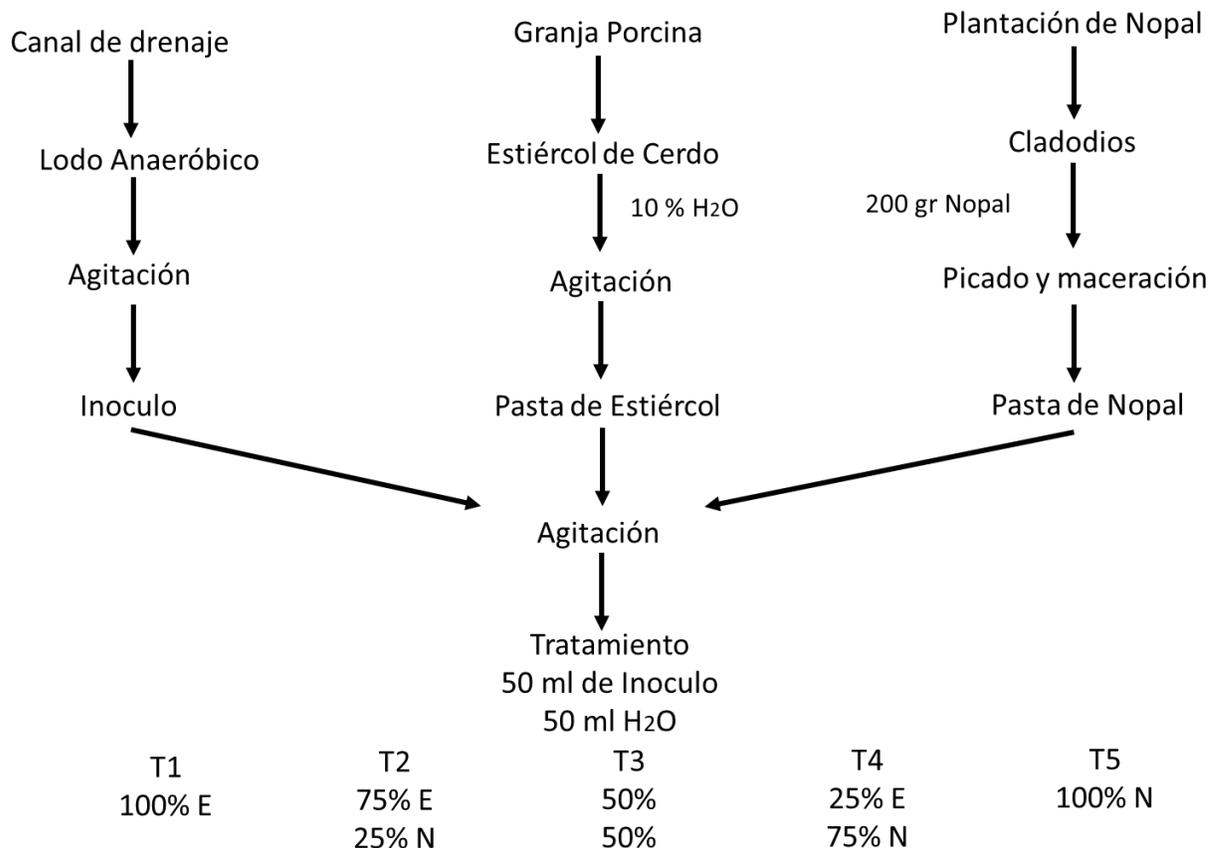


Figura 5.- Diagrama de flujo para la realización de la presente investigación en la caracterización de biogás con diferentes proporciones de nopal (*Opuntia ficus-indica*).

Las temperaturas de incubación fueron 35° C y 40° C. El análisis cromatográfico se realizó en un equipo Hewlett Packard 5890 serie II usando un detector TCD con helio como gas acarreador a un flujo de 30 mL/min⁻¹ en una columna 60/80 Carboxen-1000, (4.6 m x 1/8 in. X 2.1 mm), con una temperatura de inicio de 80°C mantenida por 5 min. Para alcanzar una temperatura de 230°C a una rampa de 15°C/min manteniendo la temperatura durante 4 minutos, esto fue realizando en los laboratorios del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. De cada tratamiento se utilizó un digestor para la muestra a ser analizada. Para los tratamientos a 35°C los análisis se realizaron a los 7 y 41 días de incubación;

mientras que para los incubados a 40°C se analizó a los 7 y 34 días. Para el análisis cromatográfico se tomaron las muestras de biogás en bolsas Tedlar (Instrumentos Nutech, Inc.; Plano Texas, E.U.A). Para la etapa de caracterización se monitoreo el volumen de la producción de biogás ya que como se menciona anteriormente se modificó el porcentaje de los sustratos utilizados, se observó hasta un periodo de 17 días para cada tratamiento por triplicado.

4. RESULTADOS

4.1 Producción de Biogás

El análisis de varianza para las observaciones de producción de biogás con cinco tratamientos, tres repeticiones y dos temperaturas (factorial 5x3x2) de incubación aparece en el Cuadro 5. Los valores de probabilidad obtenidos indican que en base a los volúmenes de producción de biogás cuantificados existió diferencia significativa entre las temperaturas de incubación y entre los cinco tratamientos con que se diseñó la presente investigación, no así para la interacción entre ellos.

Cuadro 5.- Análisis de varianza para la producción de biogás con cinco tratamientos a dos temperaturas de incubación.

Fuente	GL	F-Calculada	Valor de Probabilidad (<i>p</i>)
Temperatura	1	7.22	0.0140
Tratamiento	4	9.70	0.0000
Temperatura*Tratamiento	4	1.50	0.2400

El Cuadro 6 proporciona los valores promedio del volumen de biogás producido para cada uno de los tratamientos evaluados a 30 o 40° ($n = 3$) de incubación, así como los promedios para cada tratamiento ($n = 6$) incluyendo el nivel de significancia estadística ($p < 0.05$). Los resultados muestran diferencia significativa entre temperaturas de incubación. Esto sugiere que la temperatura de incubación de 30°C es la más favorable para la producción de biogás. Por otra parte, el incremento de BN de T1 a T5 disminuyó la producción de biogás hasta alcanzar 353 ml en promedio para las 6 repeticiones, tres para cada temperatura, en T5.

Cuadro 6.- Volumen promedio (ml) de biogás producido a las temperaturas de incubación y promedios por tratamiento (ml)

Tratamiento	Temperatura de Incubación (°C)		Promedio por Tratamiento		
	n	30 ^{a*}			40 ^b
	n	Volumen Producido		n	Volumen Producido
T1	3	543	505	6	524 ^a
T2	3	438	462	6	450 ^{ab}
T3	3	449	408	6	428 ^{bc}
T4	3	401	307	6	376 ^{bc}
T5	3	431	322	6	353 ^c

*Letras diferentes significa diferencia significativa entre promedios con $p < 0.05$.

4.2 Contenido de Humedad, Sólidos Volátiles, pH y DQO

El Cuadro 7 presenta el análisis de varianza para los cinco tratamientos a dos temperaturas de incubación con tres repeticiones para *H* y *SV*. El análisis muestra que hay diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre las condiciones experimentales (mezclas iniciales y las temperaturas de incubación) así como para las mezclas formuladas de EC y BN (T1 a T5).

Cuadro 7.- Análisis de varianza para el porcentaje de contenido de humedad y sólidos volátiles observados en las mezclas preparadas inicialmente y al final del periodo de incubación.

Fuente	GL	Humedad		Sólidos Volátiles	
		F	p	F	p
Con. Exp.*	2	5.82	0.007	16488.04	0.00
Tratamiento	4	424	0.000	235.00	0.00
Interacción	8	2.29	0.048	47.34	0.00

Por otra parte, el mayor contenido de *H* se presentó en T5 disminuyendo consistentemente hasta el T1 es decir que este parámetro estuvo directamente relacionado con el contenido de nopal para cualquier condición experimental.

Contrastantemente, los valores promedio para *SV* se comportaron en forma inversa siendo mayores para T1 y menores hacia T5. Siendo estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) los promedios evaluados de *SV* y *H* entre tratamientos para la etapa inicial y final del periodo de incubación.

Cuadro 8.- Valores promedio de humedad y sólidos volátiles observados en las mezclas preparadas inicialmente y al final del periodo de incubación.

Trat.	Humedad Observada (%)				Sólidos Volátiles (%)			
	Condición experimental				Condición Experimental			
	Inicio	30 °C	40 °C	\bar{X}	Inicio	30 °C	40 °C	\bar{X}
T1	78.70	80.25	77.68	78.87 ^a	18.84	15.80	16.43	17.02 ^a
T2	82.49	85.01	83.64	83.71 ^b	14.47	12.44	11.95	12.95 ^b
T3	88.33	87.88	87.20	87.80 ^c	10.73	10.38	9.45	10.18 ^c
T4	90.59	91.75	91.76	91.36 ^d	7.87	6.47	5.97	6.77 ^d
T5	95.72	94.27	94.27	94.75 ^e	3.68	3.76	6.85	4,76 ^e

\bar{X} Valor promedio para tratamientos.

El Cuadro 9 presenta el análisis de varianza para *DQO* y los valores de pH para las muestras colectadas de las tres condiciones experimentales de acuerdo a la formulación inicial de cada tratamiento y al final de su periodo de incubación a 30 y 40 °C. La concentración de *DQO* corresponde a las mezclas EC y BN para dar inicio a la evaluación de producción de biogás. La evaluación estadística mediante ANOVA presentó diferencia significativa entre tratamientos. Mientras que los valores promedio para *DQO* y las lecturas de pH en cada condición experimental se comportaron en forma inversa al contenido de humedad siendo mayores para T1 y menores hacia T5 en cualquier condición experimental. También es posible observar en este Cuadro que el pH disminuyó en los primeros cuatro tratamientos a 30 y 40 °C.

Cuadro 9.- A) análisis de varianza para DQO y B) valores promedio de DQO y pH de las mezclas iniciales y pH de la muestra colectada de los reactores de incubación al final del experimento.

A)

Fuente	GL	DQO	
		F	P
Tratamientos	4	5.79	0.002

B)

Tratamiento	Inicio		Temperatura de Incubación	
	DQO(mgO ₂ /L)	pH	30 °C	40 °C
T1	526 ^{a*}	6.93	pH 5.55	pH 5.87
T2	514 ^a	6.36	pH 5.48	pH 5.74
T3	498 ^a	5.93	pH 5.40	pH 5.51
T4	383 ^{ab}	5.38	pH 5.18	pH 5.23
T5	315 ^b	4.60	pH 5.21	pH 5.58

4.3 Modelación de la cinética de producción de Biogás

Un ejemplo de los parámetros cinéticos utilizados para simular el comportamiento de los datos observados y su bondad de ajuste se presentan en el Cuadro 9 para el T1. El resto de los parámetros para los cinco tratamientos, nueve modelos a 30 y 40°C de incubación se presentan en el Anexo 2 de este manuscrito. En los parámetros cinéticos del T1 podemos observar que el tiempo de aclimatación proporcionado por γ fue igual a cero días, en aquellos modelos que incluyen este parámetro, mientras que el tiempo a la mayor tasa de producción (t_0) se presentó a los 1.19 días. Los parámetros de forma (n , m y ν) y la máxima tasa de producción de biogás fueron altamente variables. Por otra parte, el coeficiente de tasa de reacción (k) fue más alto en el modelo de Fitzhugh y muy similar en el modelo de primer orden, Cone y BPK fluctuando en un rango de 0.23 a 0.740; mientras que la

producción acumulada de biogás fue superior a 518 ml obteniendo 760 ml con la ecuación de Cone. Los resultados de las simulaciones realizadas para todos los tratamientos (Figura 6 a la 15) mostraron una diferencia significativa ($p < 0.05$) para la cinética de producción a 30 y 40°C de incubación. Sin embargo, los modelos utilizados y los datos observados de la producción de biogás al ser comparados exhibieron una tendencia lineal con una bondad de ajuste estadísticamente similar ($p > 0.05$), superior a 0.92, a una temperatura de incubación de 30°C. Los modelos que mejor ajustaron a los datos fue Cone Fitzhugh, PK, Monomolecular y Transferencia mientras que el menor ajuste fue obtenido para los modelos logísticos. Los parámetros cinéticos mostraron una producción acumulada de biogás mayor en T1 de aproximadamente 540 ml disminuyendo a un valor cercano a los 350 ml en el T4; incrementando, a 400 ml en T5. Debemos mencionar que la ecuación de Cone a diferencia de los otros modelos consistentemente mostró valores acumulados de biogás más altos que los otros modelos llegando a alcanzar 1188 ml en T4 a esta temperatura de 30°C de incubación. Contrastantemente, para la incubación a 40°C las cinéticas de producción de biogás si mostraron bondades de ajuste estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) siendo más baja en el T1 y T5. En general r^2 fue más baja con los valores más altos para T4 siendo el mejor modelo para todos los tratamientos la ecuación de Cone para simular los volúmenes acumulados de biogás.

Cuadro 10.-Parámetros obtenidos y de bondad de ajuste (R^2) para los modelos utilizados en la simulación de los datos observados en el T1 con una temperatura de incubación de 30°C

Modelo Cinético	Parámetro							
	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*	r^2
Exponencial de Primer Orden	552.21	0.75	1.19					0.993
Fitzhugh	552.21			0.29				0.989
Cone	760.2			0.23	0.89			0.998
BPK	552.2			0.74	1.18			0.993
Monomolecular	552.21			0.29				0.993
Gompertz Modificado	522.86	104.41						0.9654
Logístico	518.77	96.84				0		0.948
Trasferencia	552.21	157.59						0.993
Richards	523.32	0.01					0	0.965

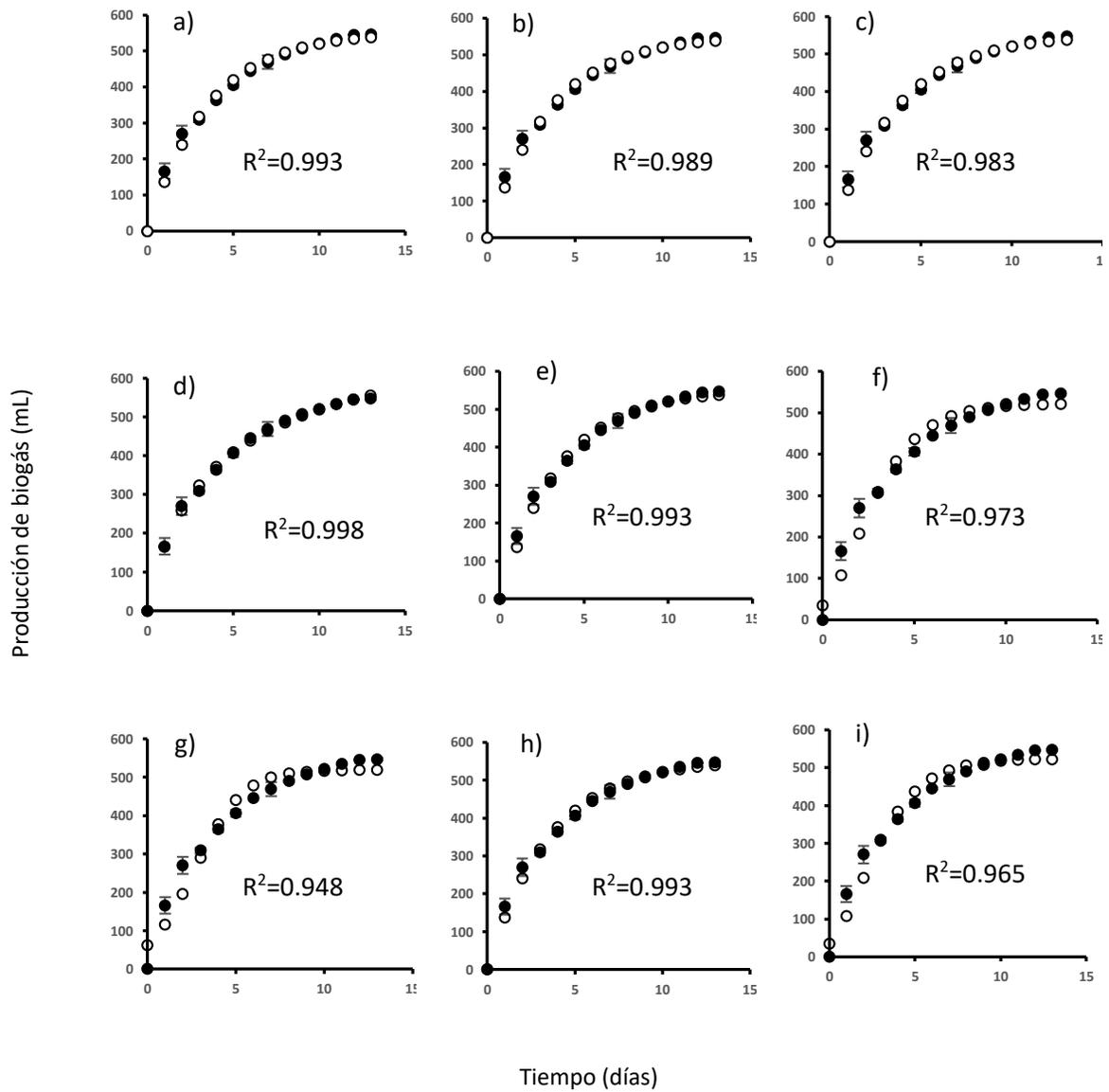


Figura 6.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T1_30°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Traslación; i) Richards.

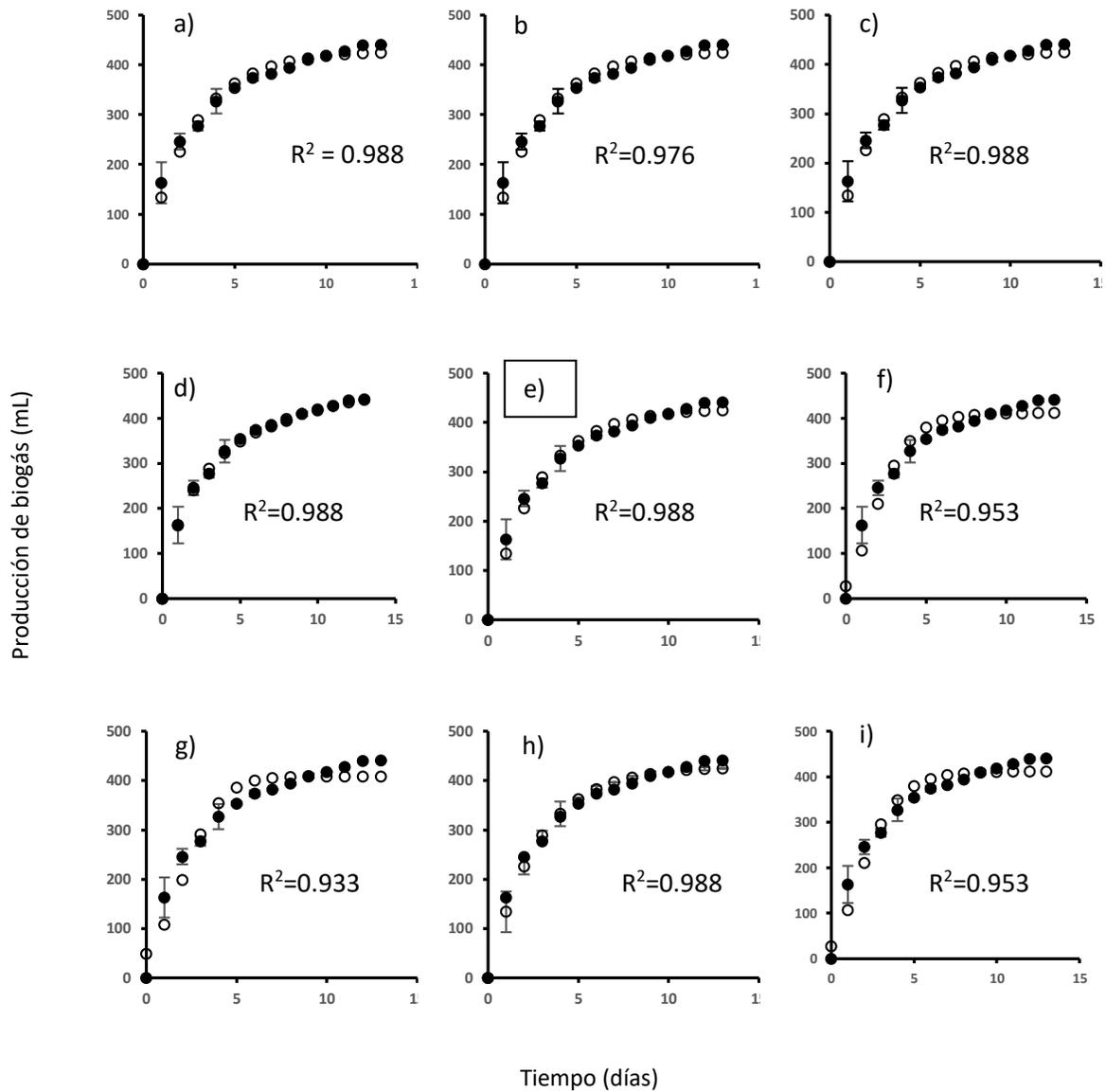


Figura 7.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T2_30°C. a) BKP; b) Primer orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

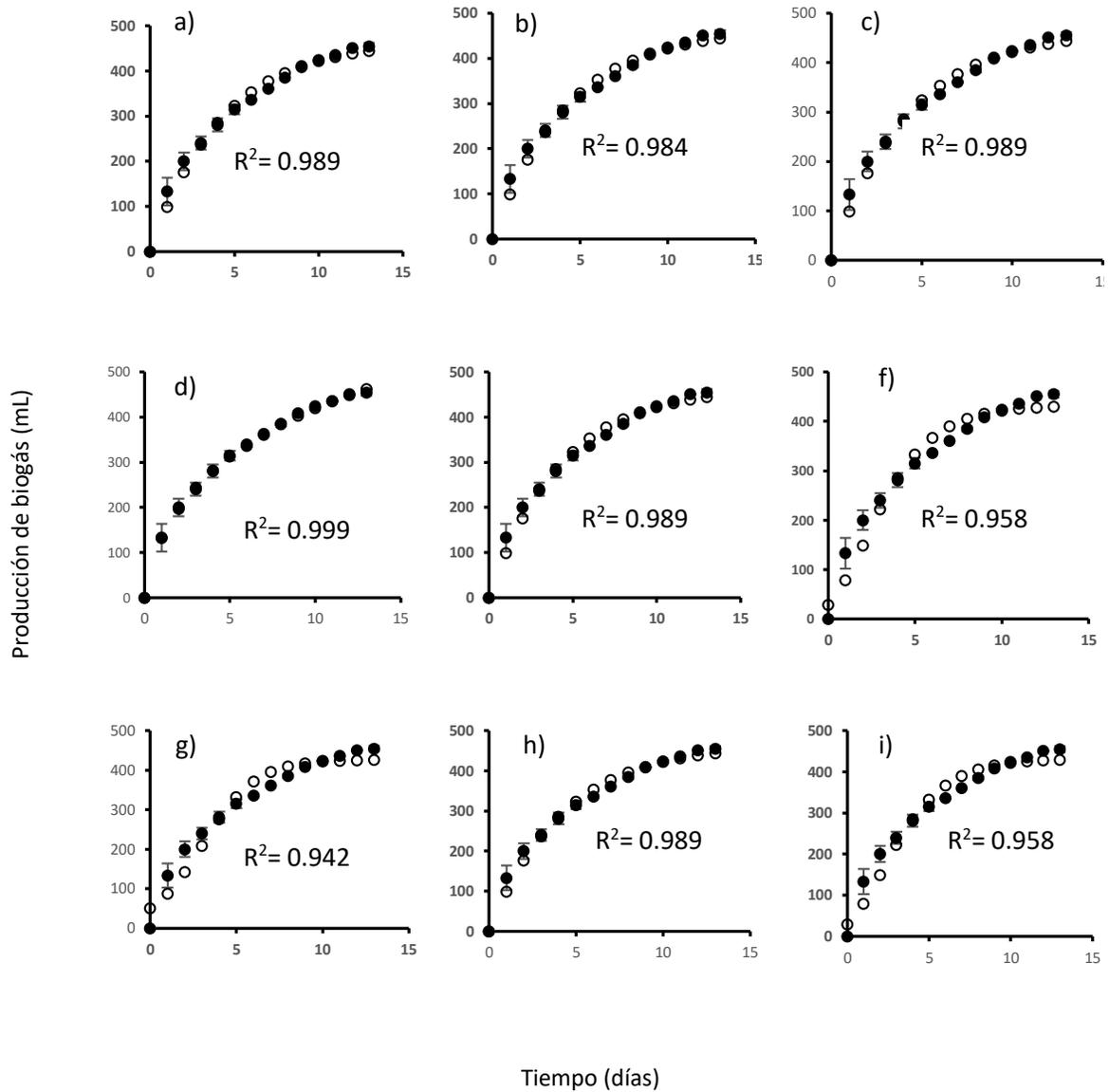


Figura 8.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T3_30°C. a) BKP; b) Primer orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

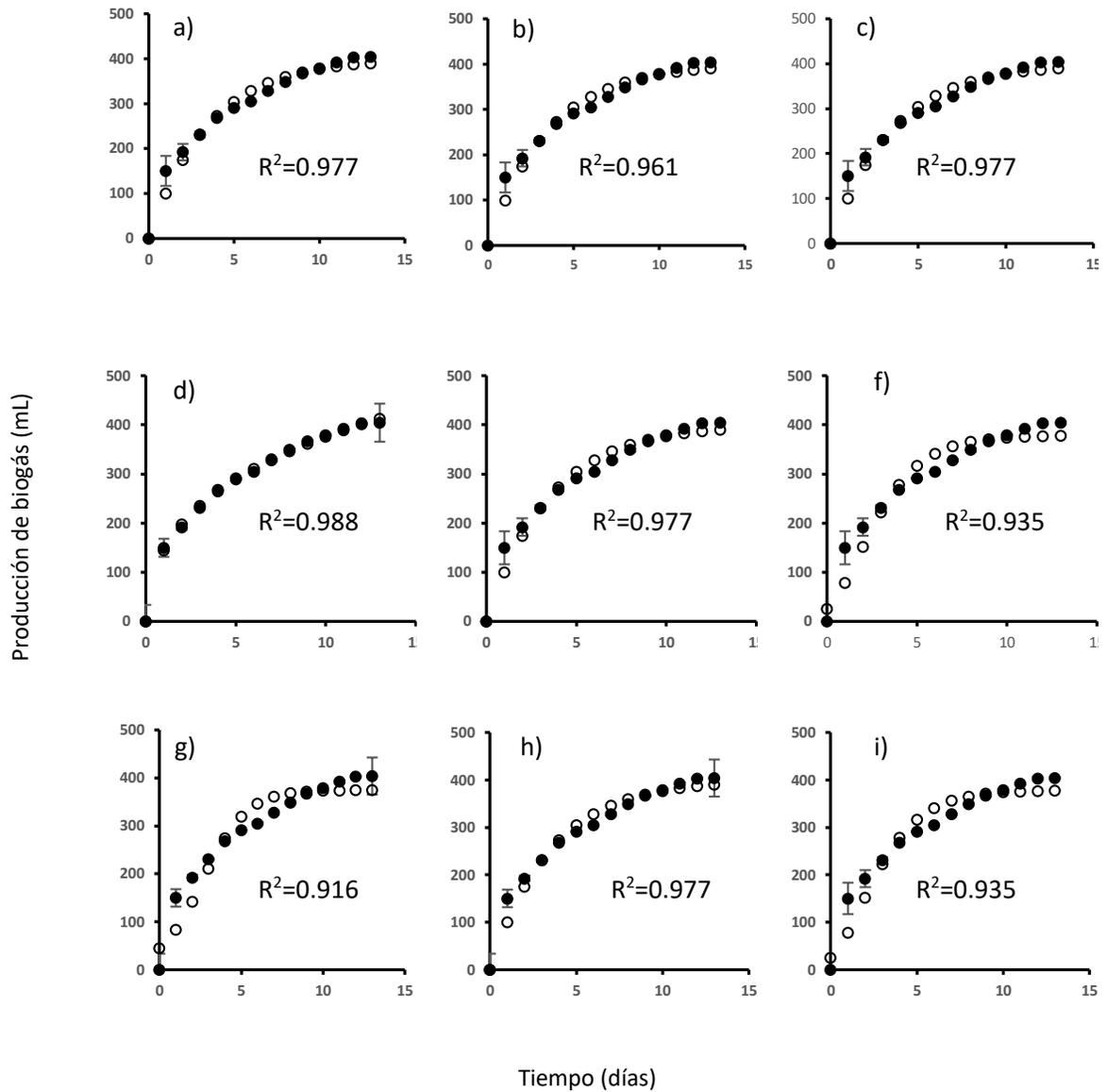


Figura 9.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T4_30°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

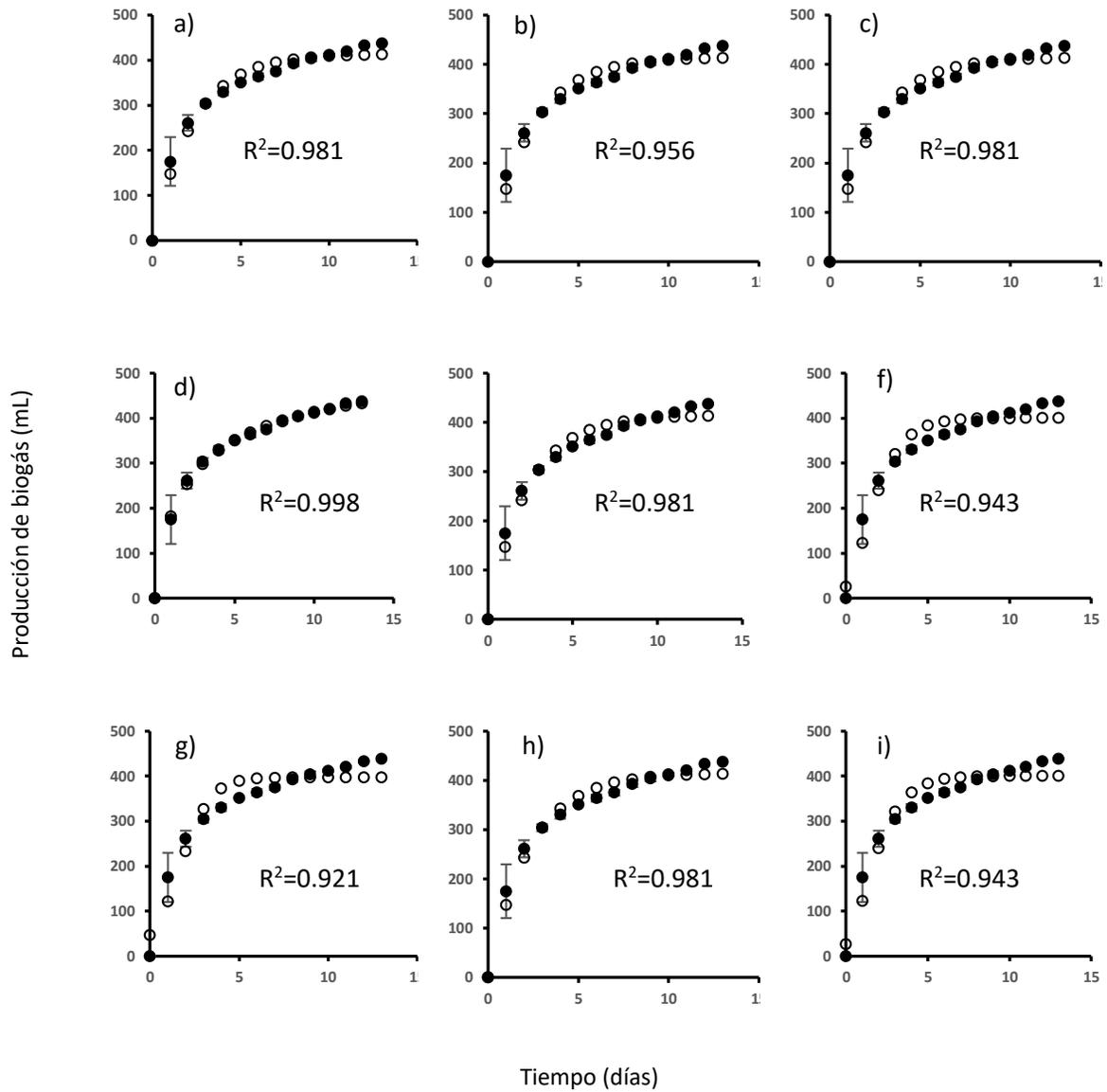


Figura 10.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T5_30°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

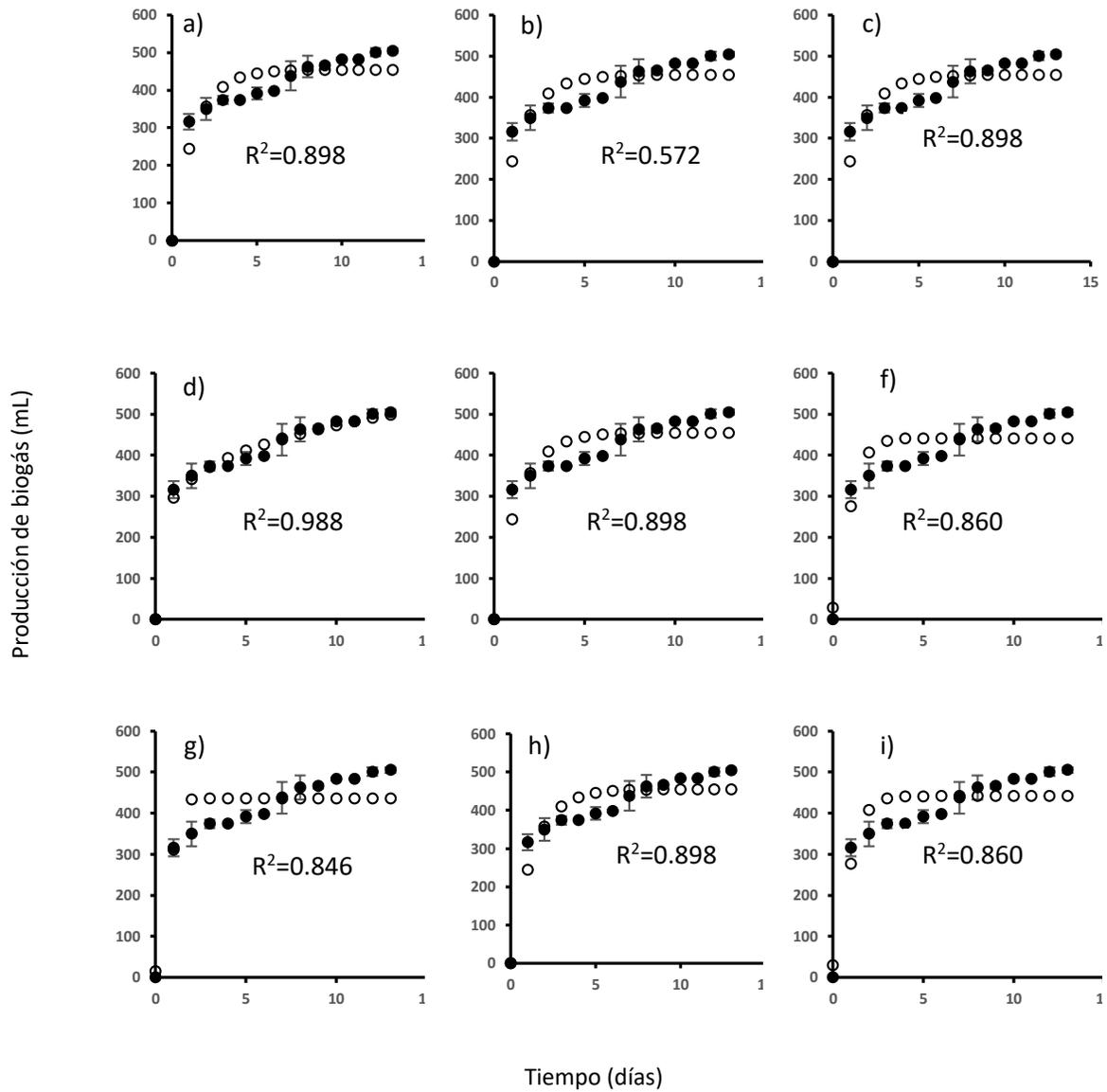


Figura 11.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T1_40°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

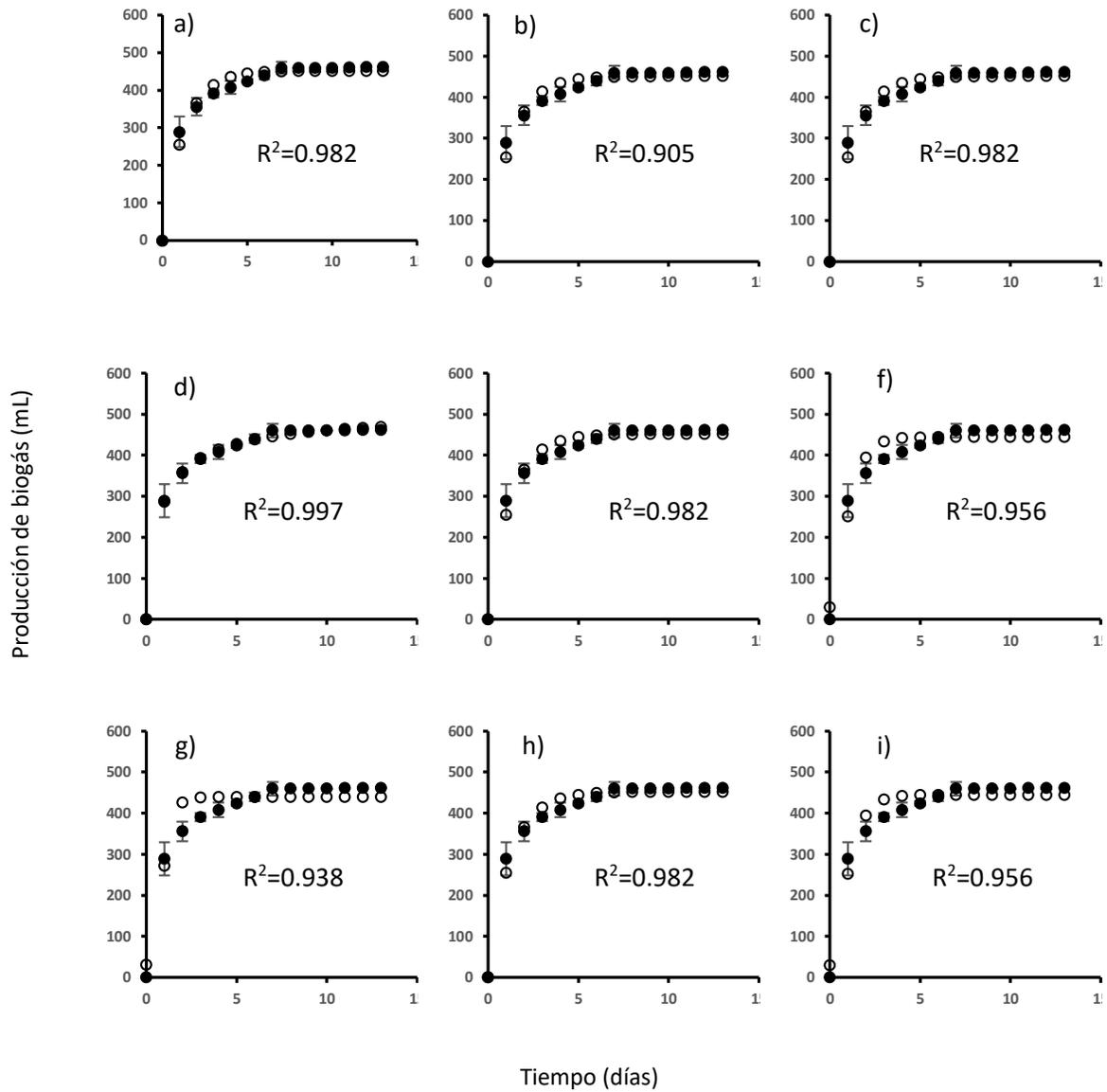


Figura 12.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T2_40°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

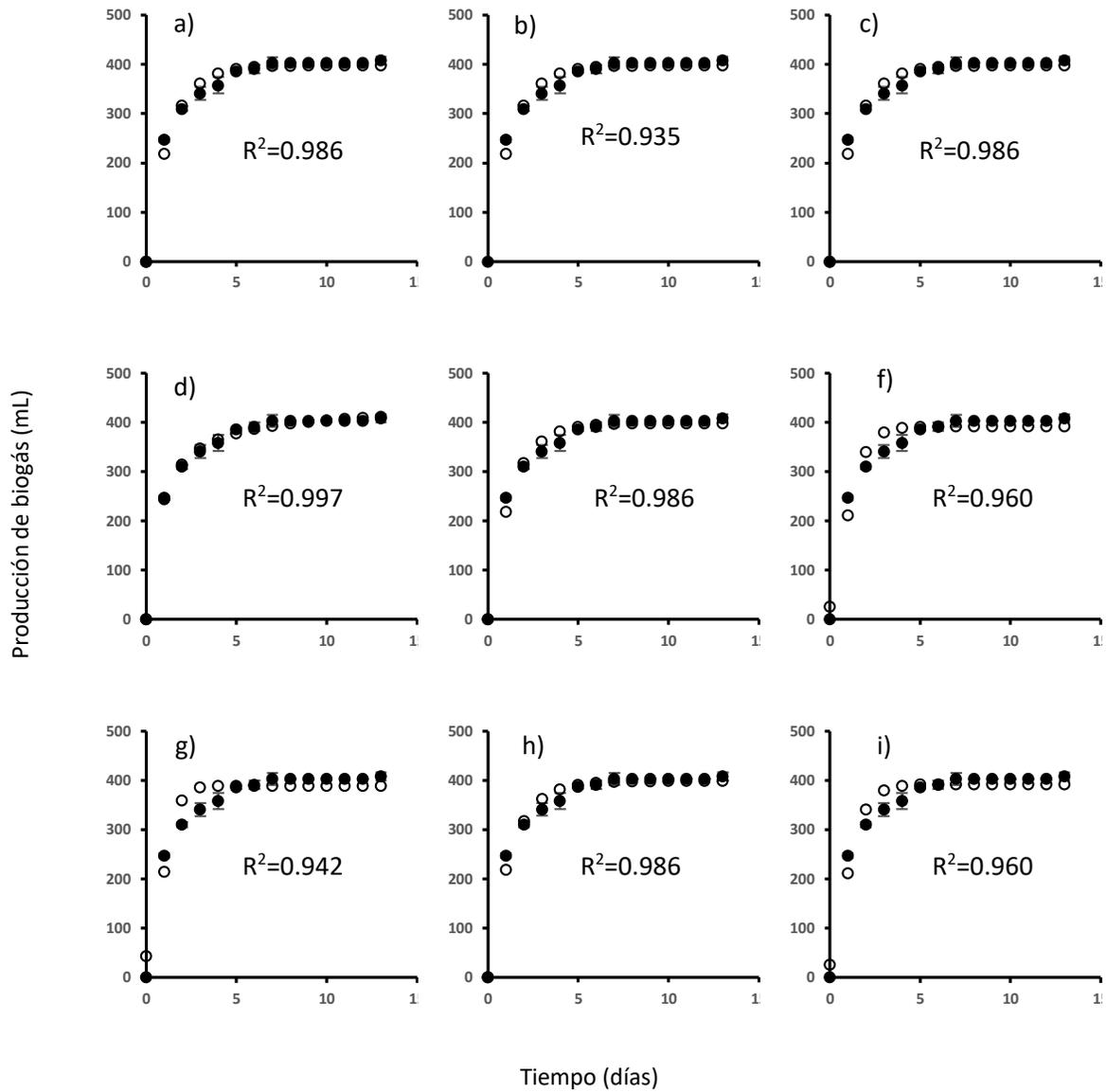


Figura 13.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T3_40°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

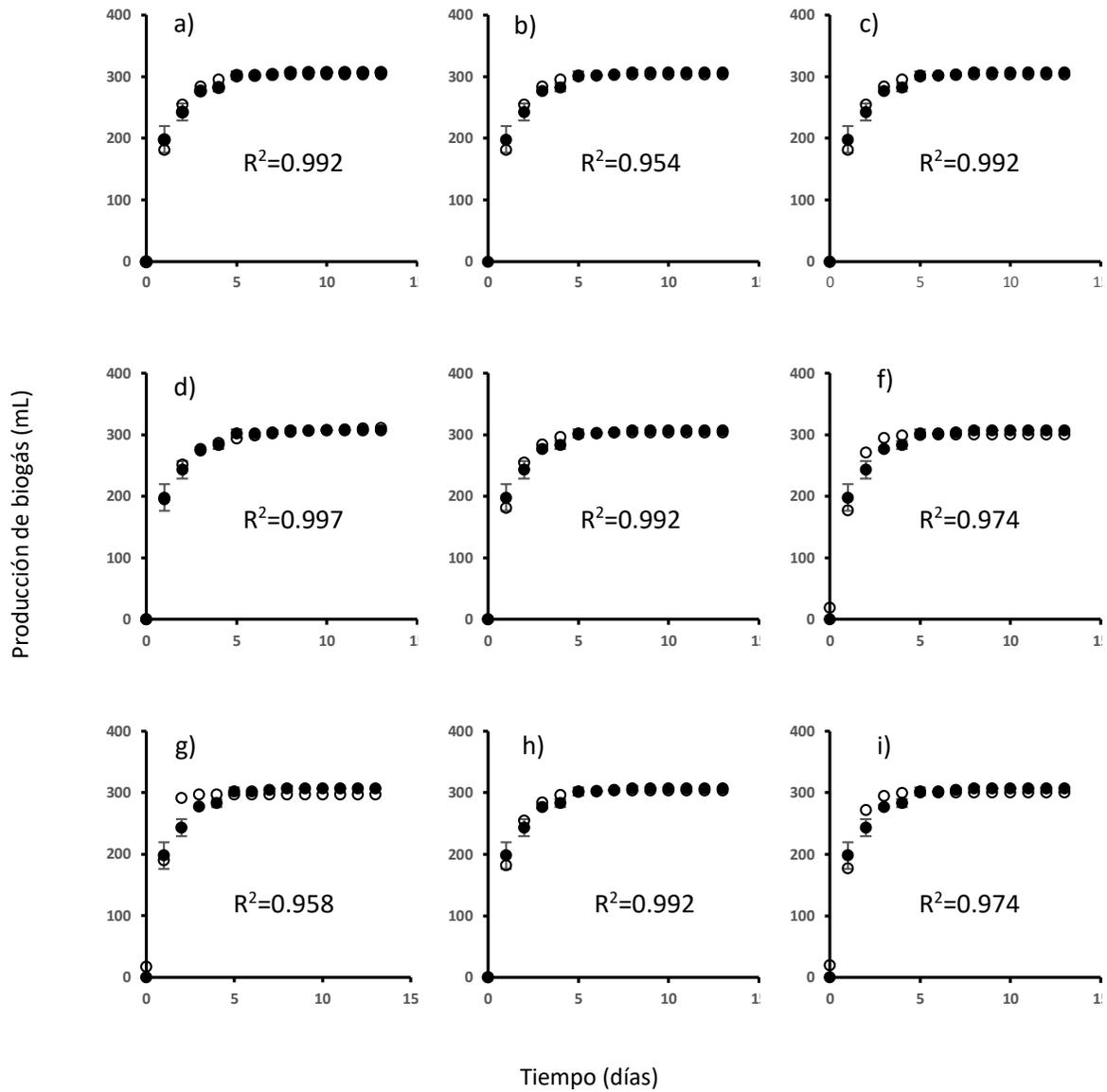


Figura 14.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T4_40°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

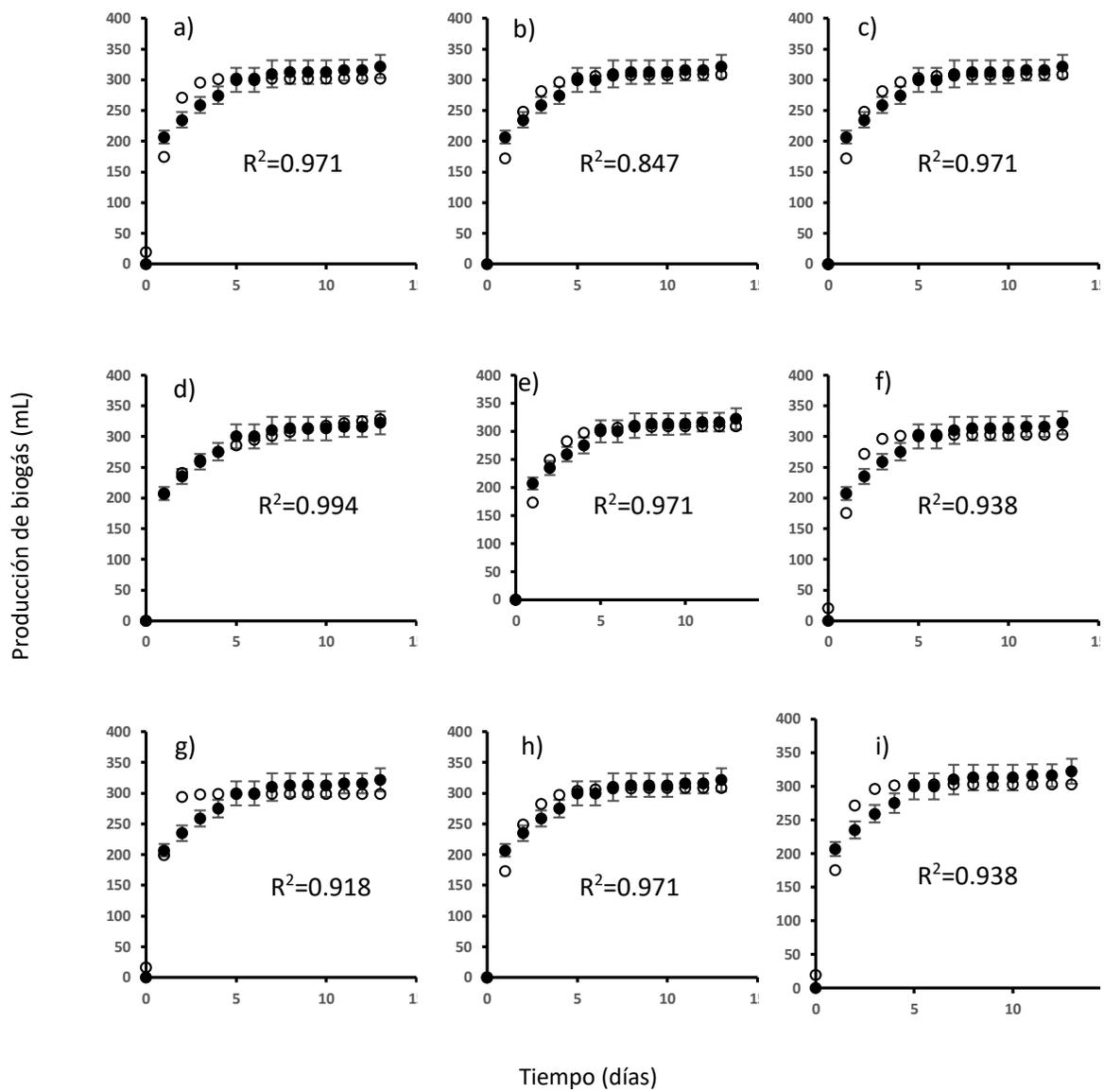


Figura 15.- Modelos utilizados para simular (○) los datos observados (●) para T5_40°C. a) BKP; b) Primer Orden; c) Fitzhugh; d) Cone; e) Monomolecular; f) Gompertz g) Logistic; h) Trasferencia; i) Richards.

4.4 Caracterización del biogás

Los resultados de producción de CH_4 para el inoculo después de un periodo de incubación de 24 h a 35°C reveló una emisión de metano del 26% y una producción para los tratamientos menor al 1%. Para la etapa de caracterización del biogás, la máxima producción de biogás se presentó en T1 con 1353 ml a los 17 días de incubación cuando la producción de biogás asintóticamente se acercó a su máximo nivel. En esta etapa, la producción de biogás fue de 1508 ml de biogás a 40°C , respectivamente, considerablemente mayor que para los tratamientos durante la etapa de producción de biogás a pesar de que la biomasa utilizada fue la misma. Probablemente la diferencia se debió a la mayor cantidad de inoculo añadido y agua utilizada.

El Cuadro 10 presenta los porcentajes de CH_4 y CO_2 . Es posible observar la mayor proporción de CO_2 en relación a metano CH_4 en las muestras colectadas de los biodigestores, específicamente para la toma de muestras destinadas al análisis de cromatografía. En el Anexo 1 se muestran todos los cromatogramas realizados en este estudio, que fueron los tratamientos a las temperaturas de 35°C y 40°C , además de las pruebas de blancos y algunas otras muestras donde se muestran las gráficas con el contenido de CO_2 y CH_4 respectivamente. Es importante señalar que la generación de biogás se determinó por el método de volumen desplazado en los digestores destinados para evaluar la producción de biogás. Este método ha sido frecuentemente usado (Burboa-Charis y Álvarez, 2020; Pham *et al.*, 2013) asume que el volumen de solución alcalina desplazado representa el volumen de CH_4 ya que el CO_2 es capturado en ella para formar bicarbonato (HCO_3). Sin embargo, los resultados de cromatografía muestran que las proporciones de CO_2 son muy superiores a la producción de metano.

Cuadro 11.- Producción de biogás y los porcentajes observados para CO₂ y CH₄ a las temperaturas de incubación.

Trat.*	Temperatura (°C)					
	35			40		
	Prod.* ml	CH ₄ %	CO ₂ %	Prod.* ml	CH ₄ %	CO ₂ %
T1	1353	15.58	57.99	1508		
T2	1169	14.05	47.96	1206	12.65	78.62
T3	946	11.16	34.87	1094	6.24	57.66
T4	822	17.69	69.71	974	7.28	80.94
T5	546	10.54	65.11	515	3.78	41.76

5. DISCUSIÓN

5.1 Producción de Biogás

Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron inferiores a los observados por Treviño *et al.* (2013) quienes tuvieron una producción de 11,850 ml para 100 g de biomasa con 60% de *Opuntia ficus-indica*, 40% de estiércol bovino deshidratado y 300 g de agua, durante un periodo de incubación de 14 días. Esta producción disminuyó para cualquier otra proporción de estiércol y nopal cayendo a 0 ml en el tratamiento en el que el nopal no fue incluido. El comportamiento de la producción de biogás fue inverso a nuestros resultados ya que al incrementar la proporción de nopal esta disminuye, alcanzando un mínimo de 322 ml a 40° C de incubación. Este comportamiento puede estar asociado a la disminución del pH de la mezcla a medida que se incrementa la BN en los tratamientos.

Por otra parte, un estudio conducido por Barreda-Del-Carpio *et al.* (2022) para evaluar 12 mezclas de tres tipos de sustratos de origen porcino, bovino y de roedor (cuy) determinó que la producción de biogás fue mayor en mezclas con 25% bovino, 25% porcino y 50% cuy en una relación agua-biomasa de 2:1. La temperatura de incubación estuvo en un rango de 20° a 40° C con una altitud de más de 2000 msnm. Con un porcentaje de humedad de 87.41 y 11.09 de materia orgánica para el estiércol porcino. La producción de biogás fue de 250 a 300 ml en un tiempo de 23 días. En otro estudio, Duarte *et al.* (2022) determinaron que la producción máxima de biogás se alcanza en los primeros 4 días, después disminuye, pero mantiene una constancia hasta el día 18, teniendo un tiempo de digestión de 30 días. La co-digestión de diferentes sustratos es un enfoque que frecuentemente se realiza en la investigación con respecto a la producción de CH₄. Ejemplo de este tipo de trabajos es el realizado por Wang *et al.* (2013) quienes mezclaron diferentes proporciones de lodos activados procedentes de un digestor anaeróbico y desechos procedentes de trampas de grasas de establecimientos de servicios de comida con una DQO de 55.6 ± 3.86 g/L y un pH de 6.5 a 8, en uno de sus tratamientos. En este estudio se observó que la producción de biogás fluctuó en un rango de 2.2 a 14 Ld⁻¹ con una

proporción de CH₄ del 60 al 70%, determinado por cromatografía de gases, a 37° C de incubación. En nuestro estudio los valores *DQO*, *SV* y pH disminuyeron de 526 a 315 g/L, 18.84 A 3.68% y 6.93 a 4.60, respectivamente, T1 a T5 de acuerdo al contenido de *Opuntia ficus Indica*. Los valores de *SV* y pH disminuyeron a 15.80 y 5.55 al final de la digestión a 30°C, alcanzando valores más bajos en T5. Otra investigación conducida por Mota Panizio *et al.* (2019) evaluó mezclas de agua residual de centros de sacrificios, comúnmente conocidos como rastros, y *Opuntia ficus- indica*, utilizando reactores de 8 litros con un volumen de trabajo de 6 kg. Los autores determinaron que la mejor proporción fue de 75% de agua residual y 25% de nopal con 600g de estiércol bovino a una temperatura de incubación de 38° ± 1° C. La producción de biogás acumulada fue de 87 litros de biogás con 57% de CH₄ en un periodo de digestión de 43 días, con un pH de 7.7, *DQO* 14.96 g/L y *SV* de 84%. Similarmente, Elías Jigar *et al.* (2011) también utilizó *Opuntia ficus- indica* como co–sustrato en la digestión de estiércol bovino utilizando reactores de 2.8 L para obtener un volumen acumulado de biogás de 14 L con un contenido de CH₄ de 52 a 69% para los diferentes tratamientos utilizados. La mejor mezcla fue de 75% estiércol bovino y 25% *Opuntia ficus- indica* contrastando con la proporción (%) 25:75 para ambos sustratos, respectivamente.

5.2 Modelación de la Cinética de Producción de Biogás

Un enfoque para comparar la cinética de producción acumulada de biogás en el presente estudio entre los diferentes tratamientos y temperaturas de incubación fue recurrir a las ecuaciones utilizadas por otros investigadores (Abu-Reesh, 2014; Rincón *et al.*, 2013; Jijai *et al.*, 2017). En nuestro estudio los mejores modelos matemáticos para describir el comportamiento de los datos observados fueron las ecuaciones exponenciales sobresaliendo el modelo de Cone por su bondad de ajuste para cualquier tratamiento y temperatura de incubación. Sin embargo, a la temperatura de incubación de 30°C no existió diferencia significativa de las

bondades de ajuste ($p < 0.05$) entre los diferentes tratamientos, de acuerdo al análisis de ANOVA realizado. Esto cambió considerablemente a 40°C donde la bondad de ajuste estadísticamente ($p < 0.05$) disminuyó mayormente en T1. Nuestros resultados a 40°C contrastan también con los estudios realizados por (Jijai *et al.*, 2017). Estos autores utilizaron con buenos resultados las ecuaciones de Monod, Schnute y el modelo de Gompertz para simular la producción acumulada de biogás procedente de la co-digestión de estiércol de aves y agua residual de la preparación de fideo de arroz a una temperatura de incubación de 28 a 30°C. En otro estudio conducido por Rincón *et al.* (2013), el efecto del pre tratamiento térmico en la digestión de residuo sólido del molido de olivo sobre la producción del CH₄ fue simulada con una ecuación exponencial de primer orden y el modelo logístico, la bondad de ajuste (r^2) fue de 0.97 a 0.99 y de 0.99, respectivamente. Por otra parte, Abu-Reesh (2014) utilizó el modelo de Gompertz para describir el comportamiento del volumen de biogás producido durante la digestión de suero lácteo. El periodo experimental fue de 28 días en un reactor anaeróbico de 100 L a una temperatura de 30 a 40°C y un pH de 6 a 7. La bondad de ajuste, a partir de los datos presentados, sugiere que esta ecuación describió adecuadamente el comportamiento de la producción de CH₄. De manera distinta, Sales *et al.* (2021) utilizaron diversos modelos para simular el volumen de biogás y de CH₄ producido durante la digestión del agua residual procedente de granjas porcinas, centros de sacrificios (rastros), granjas lecheras, industria cervecera, procesamiento de frutas y del procesamiento de la producción de biodiesel. Los diferentes modelos utilizados mostraron que las ecuaciones exponenciales fueron más eficientes para simular los datos observados a medida que los sustratos eran más solubles mientras que los modelos logísticos tuvieron un mejor comportamiento para sustratos de una estructura química compleja. En el caso específico de nuestro estudio ninguno de los tratamientos presentó una etapa de aclimatación a 30°C de incubación razón por la cual los modelos que presentaron mejor bondad de ajuste fueron los exponenciales y a su vez sugiere la alta disponibilidad de los sustratos solubles a ser transformados. A 40°C de incubación disminuye la bondad de ajuste de las ecuaciones utilizadas y se presentan periodos de aclimatación menores a 0.32 d.

sin embargo las ecuaciones exponenciales simularon mejor los tratamientos en donde la BN y EC fueron mezclados (T2 a T4).

En forma general podemos decir que existe una gran diversidad de modelos que pueden ser aplicados para describir el comportamiento de la producción de biogás; sin embargo, los modelos de Primer Orden y la ecuación de Gompertz aparentemente se han utilizado con mayor frecuencia. En el caso particular del presente estudio los mejores ajustes de las nueve ecuaciones utilizadas (Cuadro 4) se observaron para temperaturas de incubación de 30°C; las bondades de ajuste disminuyeron considerablemente cuando esta temperatura cambio a 40°C para los tratamientos con 100% de estiércol o nopal. Con excepción del modelo de Cone, los volúmenes acumulados (P) obtenidos mediante las ecuaciones utilizadas fueron muy cercanos a nuestros datos experimentales lo cual aparentemente fue sobre estimado con la ecuación de Cone, la cual muestra una curvatura más suave y con mejor ajuste, sin importar la temperatura de incubación o las proporciones de EC-BN.

5.3 Caracterización de Biogás

Los resultados obtenidos en este estudio con respecto a la caracterización del biogás fueron mediante cromatografía de gases las cuales muestran que las proporciones de CO₂ son muy superiores a la producción de CH₄. Algunos autores como Bakraoui *et al.* (2020); Hallaji *et al.* (2019); Chulalaksananukul *et al.* (2012) evaluaron la producción de CH₄ mediante el volumen desplazado de agua; mientras que Burboa-Charis y Álvarez (2020) evaluaron el contenido de CH₄ mediante el desplazamiento de una solución alcalina. Nuestros resultados muestran que este método de evaluación de CH₄ puede incurrir en una sobre estimación del volumen de este gas.

Por otra parte, los resultados de las cromatografías de gases realizadas por Barreda-Del-Carpio *et al.* (2022) para la producción de biogás generado por la

digestión de 3 sustratos orgánicos mostraron que la composición del biogás consiste de CH₄ (%) 33.6 ± 0.42 , CO₂ (%) 9.7 ± 0.28 , O₂ (%) 10.3 ± 0.14 , H₂S (ppm) 65.5 ± 7.78 lo cual contrasta con los resultados obtenidos en nuestro estudio en donde la producción de CH₄ fue de 10 al 17% para los diferentes tratamientos y de 34 al 64% para CO₂. Debemos mencionar que la producción más alta de CH₄ correspondió al inóculo utilizado para promover la digestión de los sustratos con un valor 26% en base al volumen de la mezcla.

6. CONCLUSIONES.

Los resultados de este proyecto sugieren que la producción de biogás es afectada por la proporción de nopal en la biomasa a ser evaluada ya que aparentemente modifica el pH en especial si es incorporado en forma macerada. Este impacto sobre el pH podría amortiguarse si el nopal es añadido en fracciones de mayor tamaño en los tratamientos para disminuir el área de contacto y por consecuencia la transferencia de masa entre la fase sólida y líquida. Otro factor importante es la temperatura de incubación la cual aparentemente debe ser menor a 40°C. En relación a los modelos utilizados nuestros resultados sugieren que las ecuaciones exponenciales son más apropiadas para simular la producción acumulada de biogás ya que proporcionaron un valor cercano a los valores de producción observados. Esto sugiere que los valores cinéticos que nos proporcionan las ecuaciones de simulación son válidos en el rango de valores obtenidos en nuestros experimentos. Sin embargo, el modelo de Cone aparentemente puede proporcionarnos una mejor estimación cuando la producción se extrapole fuera del rango de los valores experimentales. Otro aspecto a considerar es la pre digestión del EC para la producción de CH₄ ya que esto puede consumir los compuestos orgánicos de rápida digestión que no favorecen la producción de este gas el cual requiere de un periodo de aclimataciones de las poblaciones metanogénicas. La presente investigación abre oportunidades para el aprovechamiento de CO₂ y su transformación en productos de valor agregado usando otros microorganismos, como las microalgas. En relación a los métodos para evaluar la producción de biogás el método de desplazamiento de volumen es simple y económicamente viable, pero su fundamento para evaluar el volumen de metano producido debe ser revisado para establecer límites de producción de CO₂ en que pueda ser válido.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Reesh I. M. 2014. Kinetics of anaerobic digestion of labaneh whey in a batch reactor. *African Journal of Biotechnology* Vol. 13(16) pp. 1745-1755.
- Achinas, S and G. J. Euverink. 2016. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. Faculty of mathematics and Natural Sciences, University of Groningen, Nijenbrogh 4, 9747 AG Groningen, The Netherlands.
- Alam N., A, R. B. Mahar, A. Razaque S. and K. Muhammad B. 2020. Effects of isolated fungal pretreatment on bio-methane production through the co-digestion of rice straw and buffalo dung. *Energy Rev.* 206 118107.
- Amon T, B. Amon, V. Kryvoruchko, A. Machmuller, K. Hopfner-Sixt, V. Bodiroza, R. Hrbek, J. Friedel, E. Potsch, H. Wagentristl, M. Schreiner, W. Zollitsch. 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* 98 3204-3212.
- Aysu T. and M. Masuk Küçük. 2014. Biomass pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. *Energy* volume 64. Pages 1002 – 1025.
- Bakraoui M., F. Karouach, B. Ouhammou, N. Lahboubi, Y. El Gnaoui, O. Kerrou, M. Aggour and H. El Bari. 2020. Kinetics study of methane production from anaerobic digestion of sludge and wastewater recycled pulp and paper. *IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering* 946 - 012009.
- Barreda-Del-Carpio J., M. R. Ancco M., A. D. Núñez C., C. E. Aguirre, K. Tejada M. y G. M. Pacheco P. 2022. Co-Digestión de Tres Tipos de Estiércol (Vaca, Cuy y Cerdo) para Obtener Biogás en el Sur de Perú. *Revista de Investigación Altoandinas – Journal of High Andean Research* 24 (3), 174-181.

- Burboa-Charis V.A. and L.H. Alvarez. 2020. Methane production from antibiotic bearing swine wastewater using carbon-based materials as electrons' conduits during anaerobic digestion. Energy Research. Technical.
- Chastain J. P., J. J. Camberato, J. E. Albrecht and J. Adans, III. 2003. Swine Manure Production and Nutrient Content. Camm Poultry Chapter 3a.
- Chulalaksananukul S., N. Sinbuathong and W. Chulalaksananukul. 2012. Bioconversion of Pineapple Solid Waste under Anaerobic Condition through Biogas Production., KKU Res. J. 17(5):734-742
- Comparetti A., C. Greco., P. Febo. And M.M. Mammano. 2017. Potential Production of Biogas from Prinkly Pear (*Opuntia ficus – indica* L.) in Sicilian Uncultivated Areas. Article in Chemical Engineering Transactions.
- Corona Z. I. 2007. Biodigestores. Tesis de Ingeniería Industrial. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Mineral de la Reforma, Hgo. México. 64 p.
- Damartzis T. and A. Zabaniotou. 2011. Thermochemical conversión of biomass to second generation biofuels through integrated process desing – A review Renewable and Sustainable Energy Reviews volumen 15. Pages 366-378.
- Efe S. I., L. A Cheke and C. O. Ojoh. 2013. Effects of Solid Waste on Urban Warming in Warri Metropolis, Nigeria. Atmospheric and Climate Sciences. 3, 6-12.
- Estrada- Alvarez J., G. Gómez- Londoño, A. Jaramillo- Jimenez. 2008. Efecto del Biodigestor Plástico de flujo continuo en los tratamientos de aguas residuales de establos bovinos.
- Guzmán D. L. y J. Chávez. 2007. Estudio Bromatológico del Cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) Para el Consumo Humano. Rev Soc Quim Perú. 73, N° 1 (41 – 45).

- Guwy A. J. 2004. Equipment used for testing anaerobic biodegradability and activity. *Reviews in Environmental Science and Bio Technology* 3: 131-139.
- Hallaji S. M., M. Kuroshkarim and S. P. Moussavi. 2019. Enhancing methane production using anaerobic co-digestion of waste activated sludge with combined fruit waste and cheese whey. *BMC Biotechnology* 19:19
- Hammad E. I., M. R. Al-Agha and Y. El-Nahhal. 2018. Enhancing Biogas Production: Influence of Mixing Cow and Chicken Manures. *Energy and Power Engineering*. 10, 383-397.
- Huang J., Z. Yu, H. Gao, X. Yan, J. Chang, C. Wang, J. Hu and L. Zhang. 2017. Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices.
- Jia X., W. Yuan and X. Ju. 2015. Short Report: Effects of Biochar Addition on Manure Composting and Associated N₂O Emissions. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*. 5, 56-61.
- Jigar E., H. Sulaiman, A. Asfaw and A. Bairu. 2011. Study on renewable biogas energy production from cladodes of *Opuntia ficus indica*. *ISABB Journal of Food and Agriculture Science* Vol. 1(3), pp. 44-48.
- Jijay S. and C. Siripatana. 2017. Kinetic Model of Biogas Production from Co-digestion of Thai Rice Noodle Wastewater (Khanomjeen) with Chicken Manure. *Energy Procedia* 138 386 -392.
- Li C., P. Champagne and B. C. Anderson. 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and Grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Bioresource Technology* 102 9471-9480.
- Loiy Al-Ghussain. 2018. Global Warming: Review on Driving Forces and Mitigation. Published online 00 Wiley Online Library (Wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.13041.

- Matheri A. N., Member, IAENG, M. Belaid, Member, IAENG, T. Seodigeng and C. J. Ngila. Modelling the Kinetic of Biogas Production from Co-digestion of Pig Waste and Grass Clippings.
- Méndez, L.P., Flores, F.T., Martin, J.D., Rodríguez-Rodríguez, E.M., Romero, C.D. 2015. Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia Dillenii* and *Opuntia ficus indica*, Food Chemistry.
- Mönch-Tegeder M., A. Lemmer and H. Oechsner. 2014. Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. Energy 73 523 – 530.
- Ni P., T. Lyu, H. Sun, R. Dong and S. Wu. 2017. Liquid digestate recycled utilization in anaerobic digestion of pig manure: Effect on methane production, system stability and heavy metal mobilization. EGY 11895.
- Olguín, E. J. 2012. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. Biotechnology Advances 30 1031-1046
- Panizio, R.M., Calado, L.F.d., Lourinho, G. 2020. Potential of Biogas Production in Anaerobic Co-digestion of *Opuntia ficus-indica* and Slaughterhouse Wastes. *Waste Biomass Valor* 11, 4639–4647.
- Pedraza G., J. Chará, N. Conde, S. Giraldo y L. Giraldo. 2002. Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development* 14 (1).
- Rawat M., AL. Ramanathan. 2011. Assessment of Methane Flux from Municipal Solid Waste (MSW) Landfill Areas of Delhi, India. *Journal of Environmental Protection*. 2, 399-407.
- Regueiro L., M. Carballa, J. A. Álvarez, J. M. Lema. 2012. Enhanced methane production from pig manure anaerobic digestion using fish and biodiesel wastes as co-substrates. *Bioresource Technology* 123 507-513

- Rincón B., L. Bujalance, F.G. Feroso, A. Martín, R. Borja. 2013. Biochemical methane potential of two-phase olive mil solid waste: Influence of thermal pretreatment on the process kinetics. *Bioresource Technology* 140 249 – 255.
- Roberts S., N. Mathaka, M.A. Zeleke and K.N. Nwaigwe. 2023. Comparative Analysis of Five Kinetic Models for Prediction of Methane Yield. *J.Inst. Eng. India Ser. 104 (2):335-342*.
- Sales M. N. W., M. M. Holanda C., A. de Sousa S., F. S. Souza S., T. J. Tavares F., E. Lopes P. and A. Bezerra. S. 2021. Biochemical potential evaluation and kinetic modeling of methane production from six agro-industrial wastewaters in mixed culture *Environ. Pollut.*, 280:116876.
- Santos A. D., J. R. Silva, L. M. Castro and R. M. Quinta-Ferreira. 2022. A biochemical methane potential of pig slurry. *Energy Reports* 8 153 – 158
- Scarlat N., Jean-Francois Dallemand and F. Fahl. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129 457-472
- SENER. 2018. Balance Nacional de Energía [en línea], 2020 [fecha de consulta: 07 de diciembre 2016]. Disponible en: SENER | Sistema de Información Energética (energia.gob.mx)
- Solomon S., D. Qin., M. Manning., M. Marquis., K. Averyt., M. M.B. Tignor., H. L. Miller and Z. Chen. 2007. *Climate Change The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 996 pp.
- Treviño-Amador I.A., F. Mendez-Llorente., M.A. López Carlos., J. I. Aguilera-Soto., R.G.Ramirez-Lozano., M.A. Núñez-González., E.J.C. Zuñiga and J.Fuentes-Rodríguez. 2013. Biogas Production from Pig Manure Fed Opuntia robusta Diets. Article in *Acta Horticulturae*.

- Turkdogan-Aydinol F.I and K. Yetilmezsoy. 2010. A fuzzy-logic-based model to predic biogas and methane production rates in a pilot-scale mesophilic UASB reactor treating molasses wastewater. Journal of Hazardous Materials 182 460-471
- Van Lier J. B.,N. Mahmoud and G. Zeeman. 2008. Anaerobic Wastewater Treatment. Jules
- Wang L. T. N. Aziz, F.L. de los Reyes III. 2013. Determining the limits anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge with grease interceptor waste. Water Research 47 3835 -3844
- Wei L., S. Xu., L. Zhang., H. Zhang., C. Liu, H. Zhu and S. Liu. 2006. Characteristics of fast pyrolysis of biomass in a free fall reactor. Fuel Processing Technology 87 863 – 871.
- Weiland P. 2006. Biomass Digestion in Agriculture: A Successful Pathway for the Energy Production and Waste Treatment in Germany. Eng. Life. Sci. 6, No 3.
- Weissbrodt D. G., M. Laureni, Mark C.M. van Loosdrecht and Yves Comeau. 2020. Basic microbiology and metabolism.
- World Bioenergy Association. GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2022 (13 junio 2024) <https://www.worldbioenergy.org/uploads/221223%20WBA%20GBS%202022.pdf>.
- Xu X., Z. Wei., O. Ji., C., Wang and G. Gao. 2019. Global renewable energy develoment: Influencing factors, trend predictions and countermeasures. Resources Policy Volumen 63, 101.

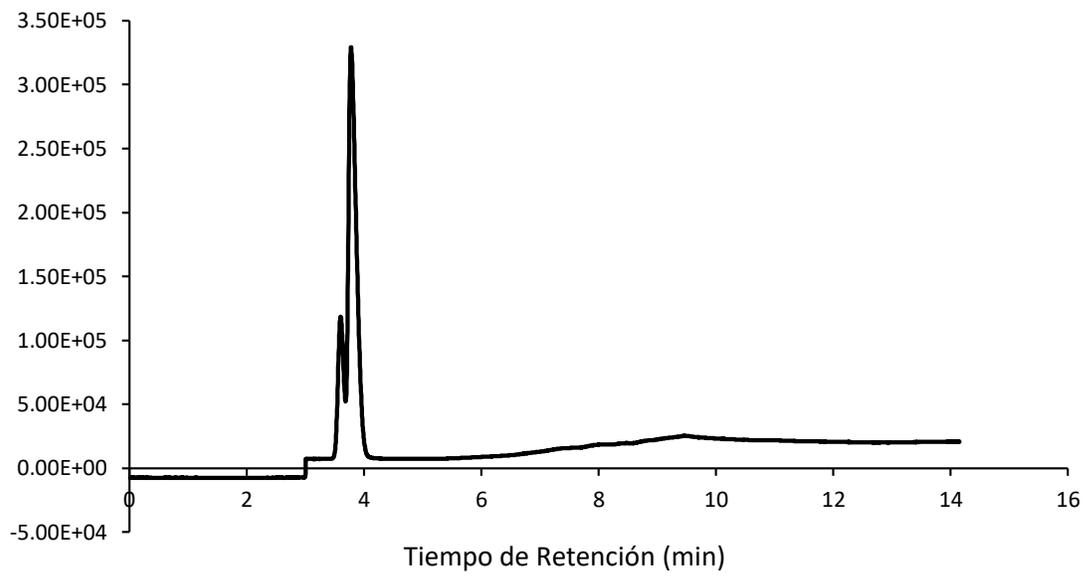
8. ANEXOS

1. Cromatogramas de las muestras analizadas de Biogás

Muestra de Blancos

BCO1

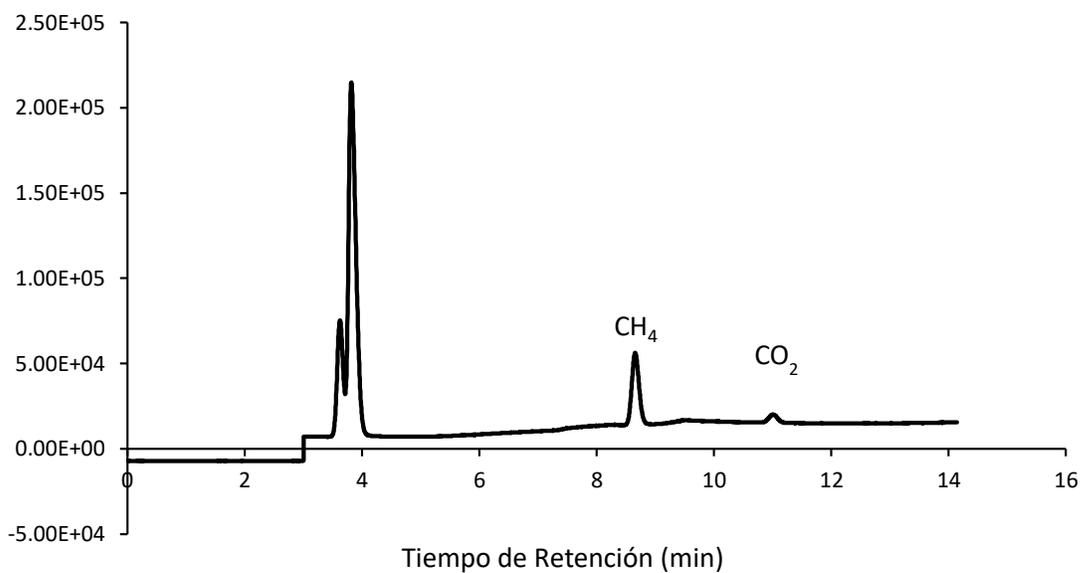
03-05-22



T1 Repetición 1

T11

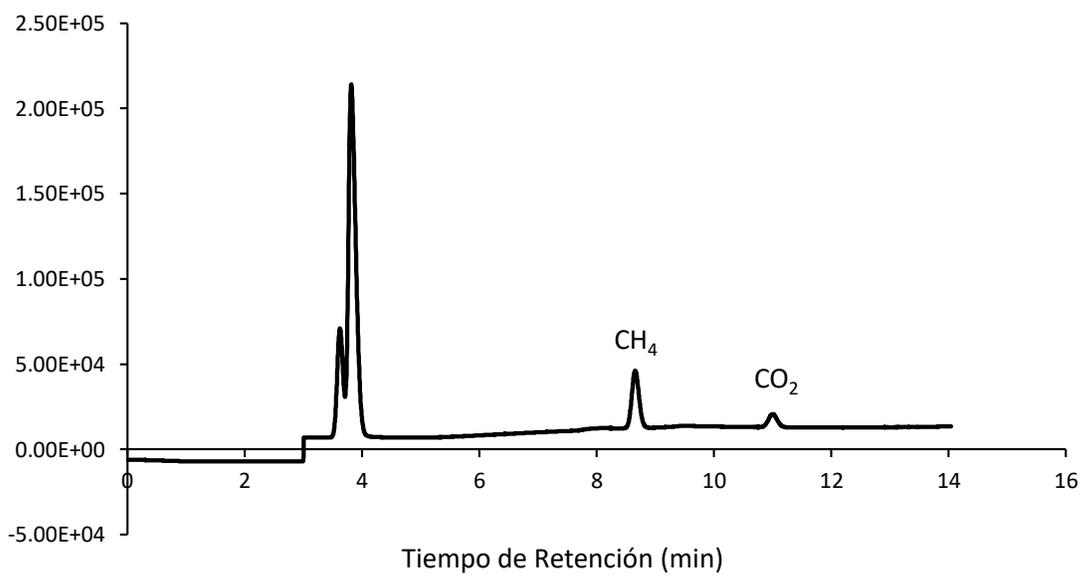
03-05-22



T1 Repetición 2

T12

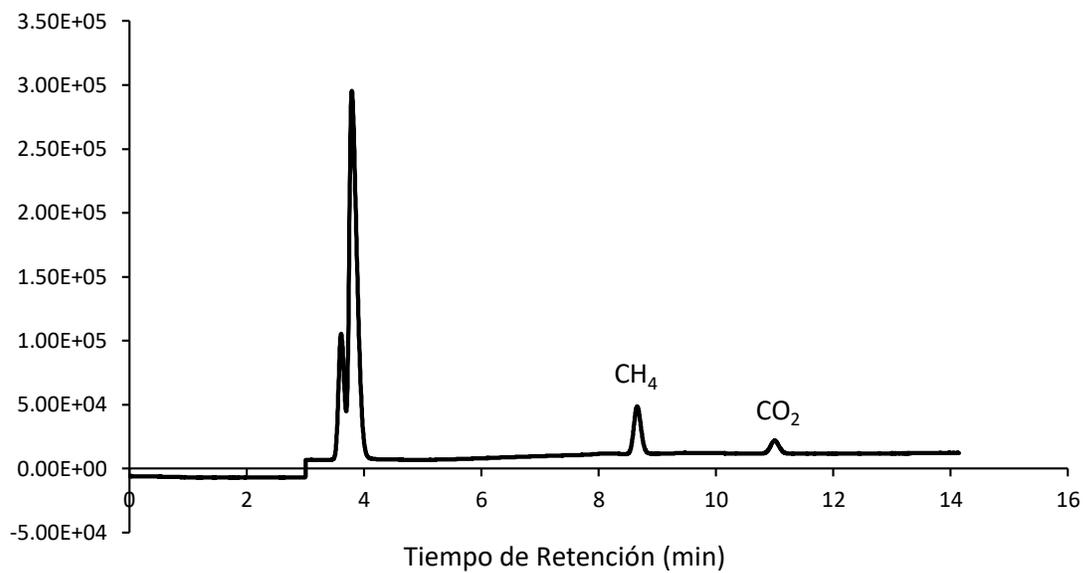
03-05-22



T1 Repetición 3

T13

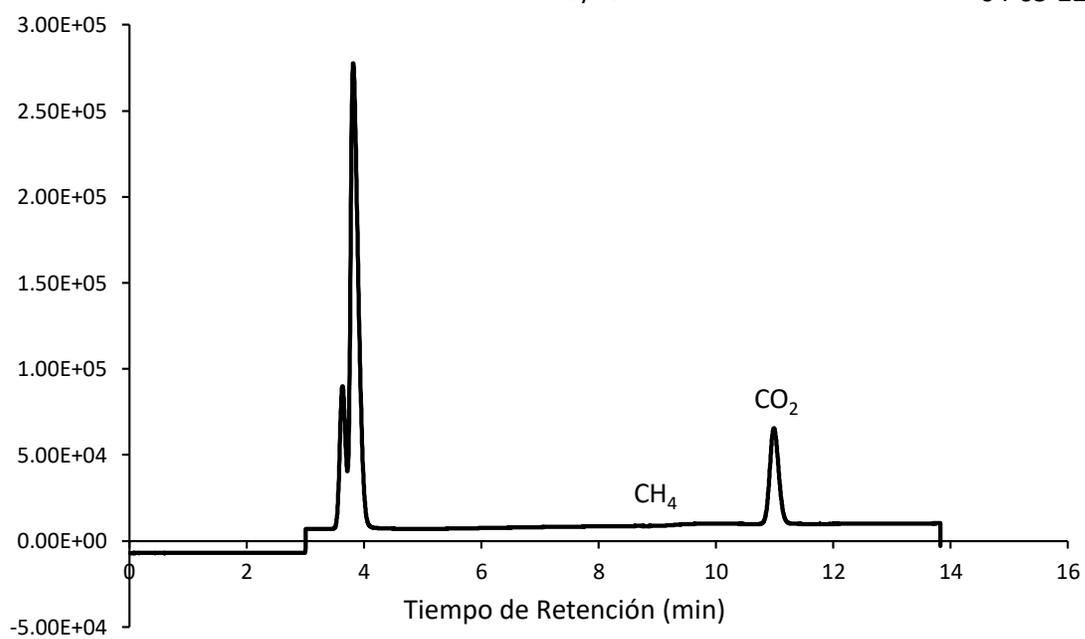
03-05-22



T2

25/75

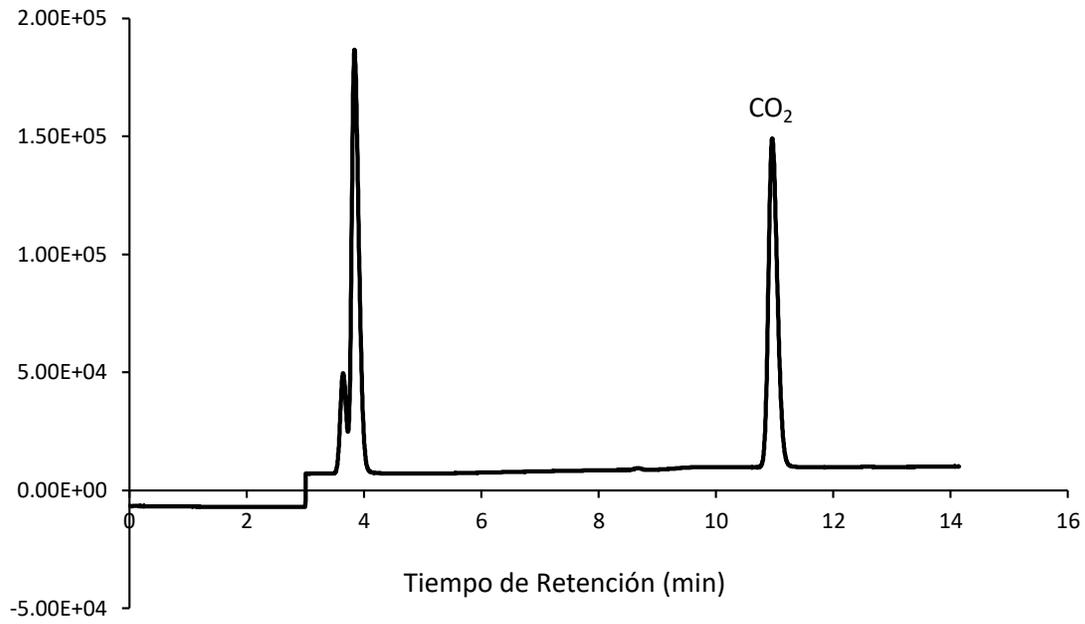
04-05-22



T3

50/50

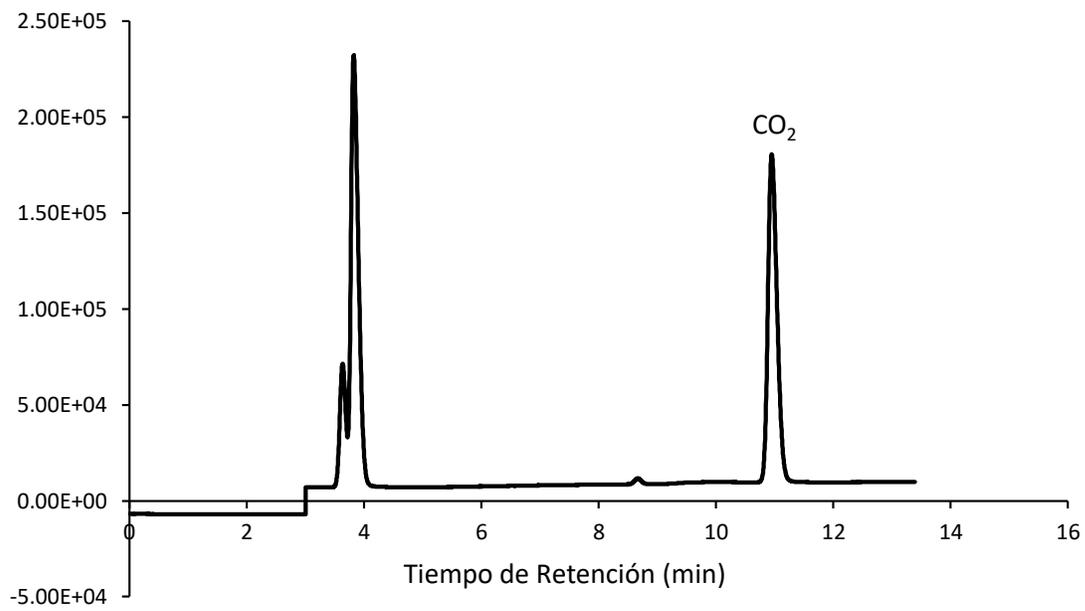
04-05-22



T2

75/25

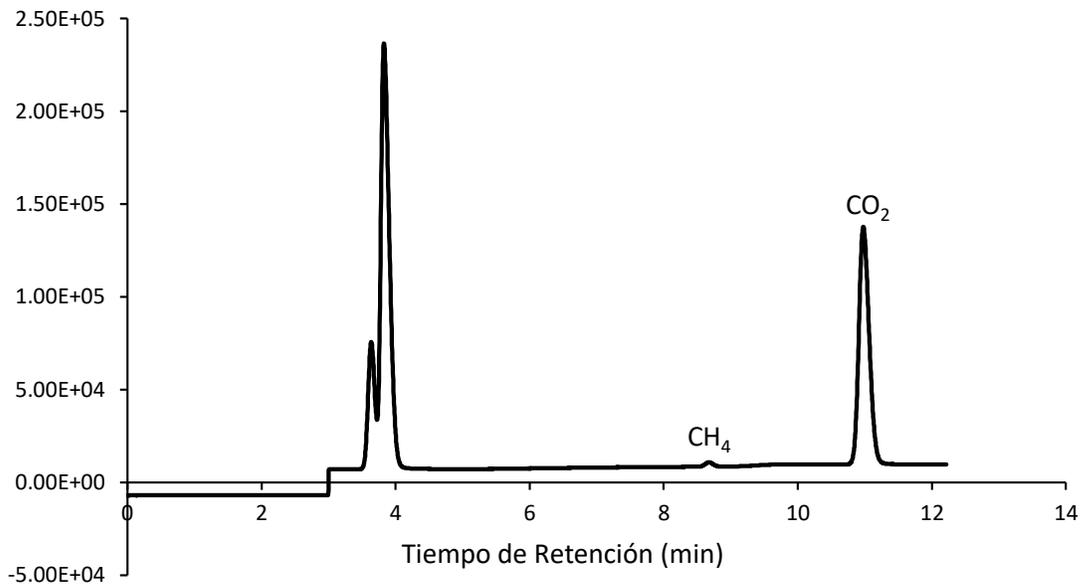
04-05-22



T2

75/25D

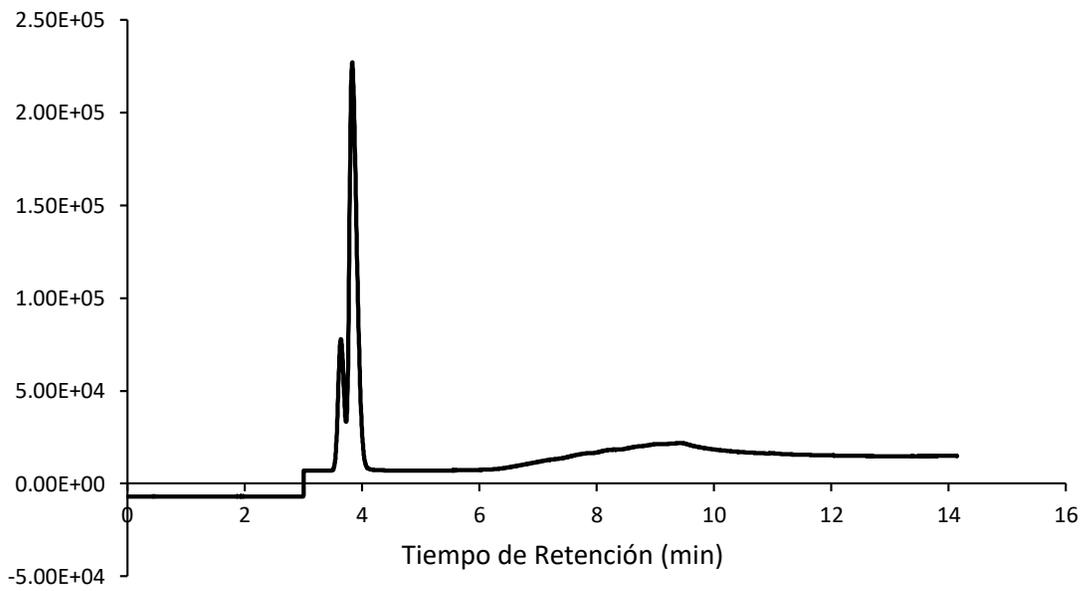
04-05-22



Muestra de Blancos

BCO1

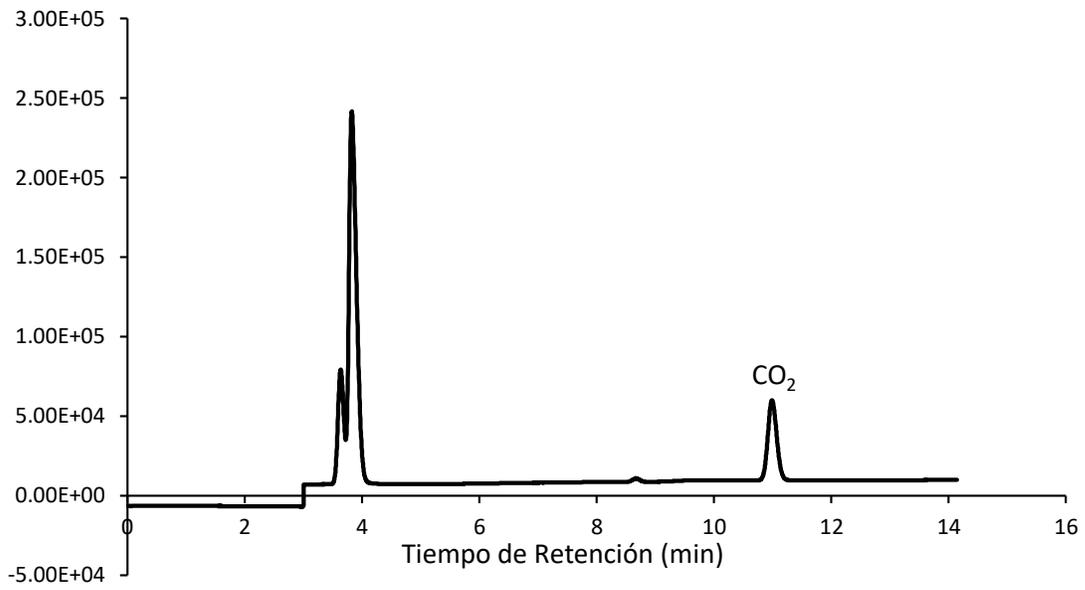
04-05-22



T1

C

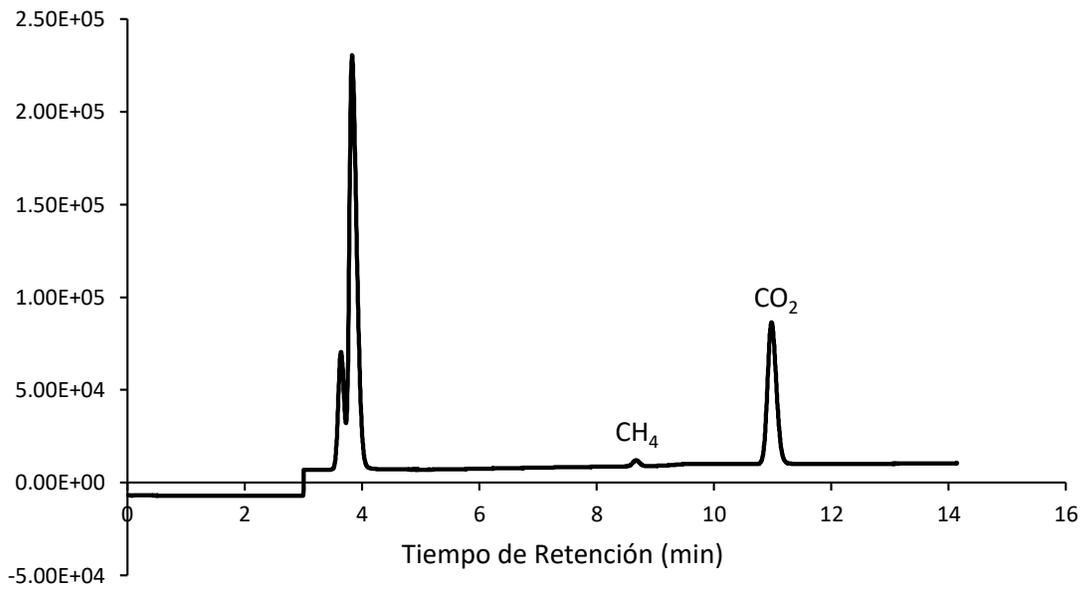
04-05-22



T1

C1

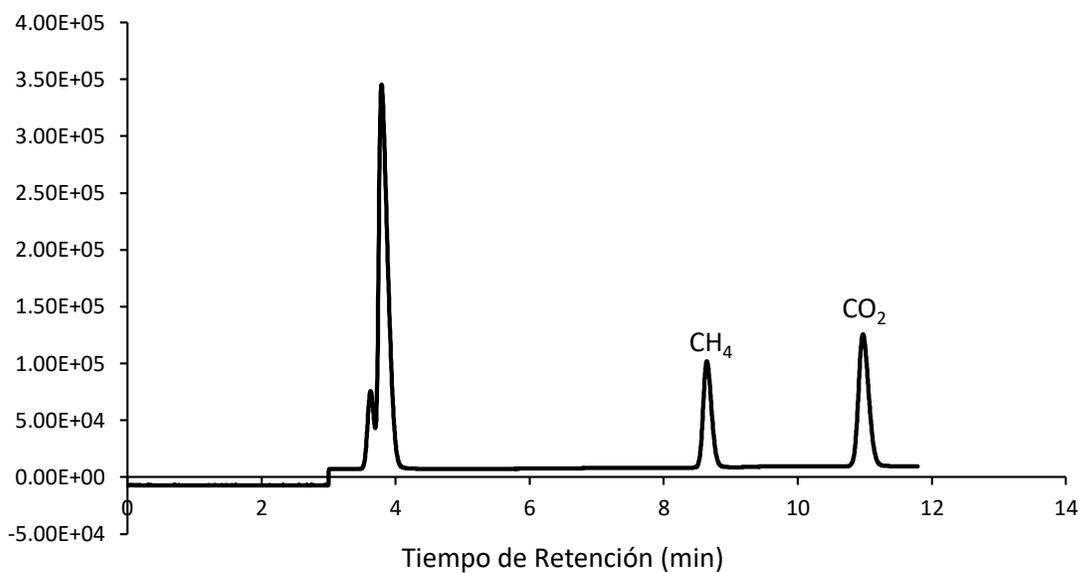
04-05-22



BCD

I

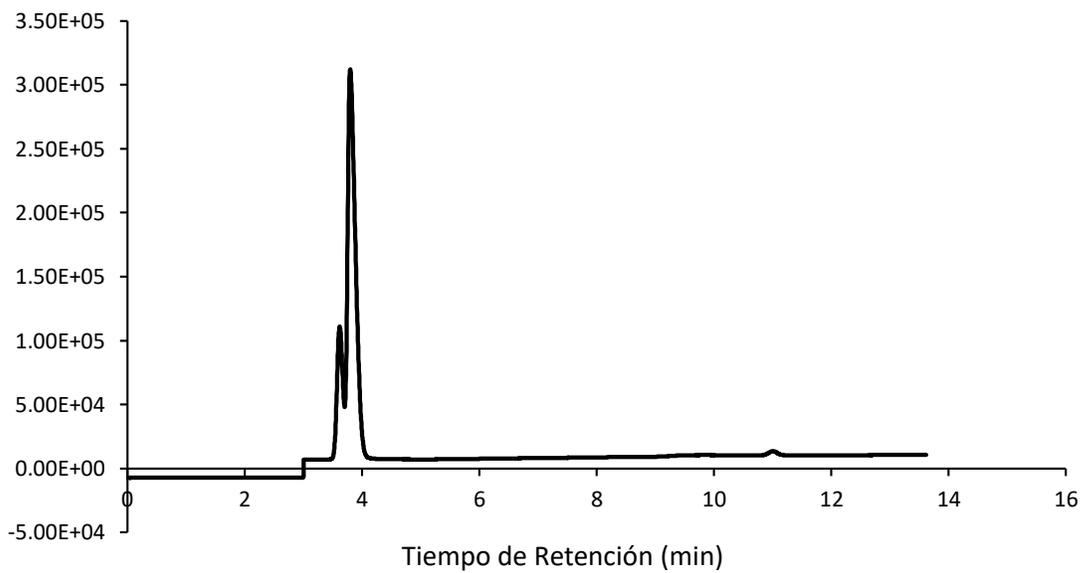
04-05-22



T5

N1

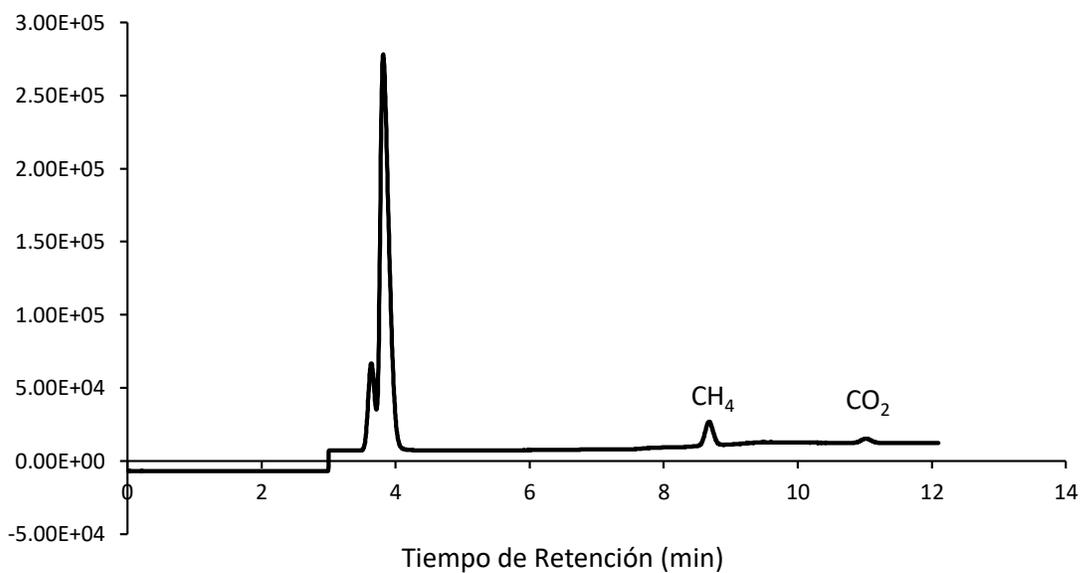
04-05-22



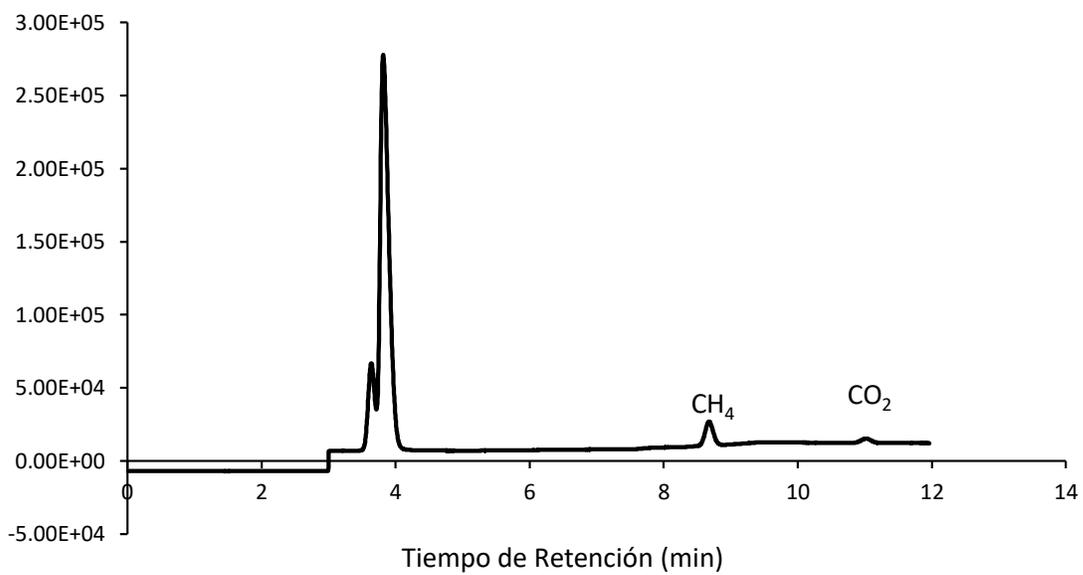
T3 Repetición 1

T31

04-05-22



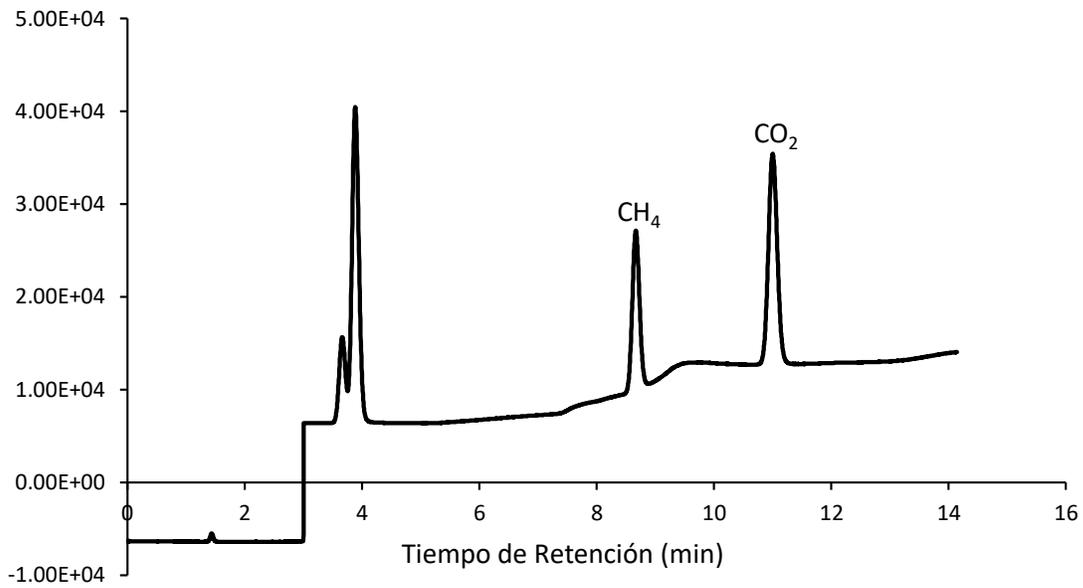
04-05-22



Estándar

EST4

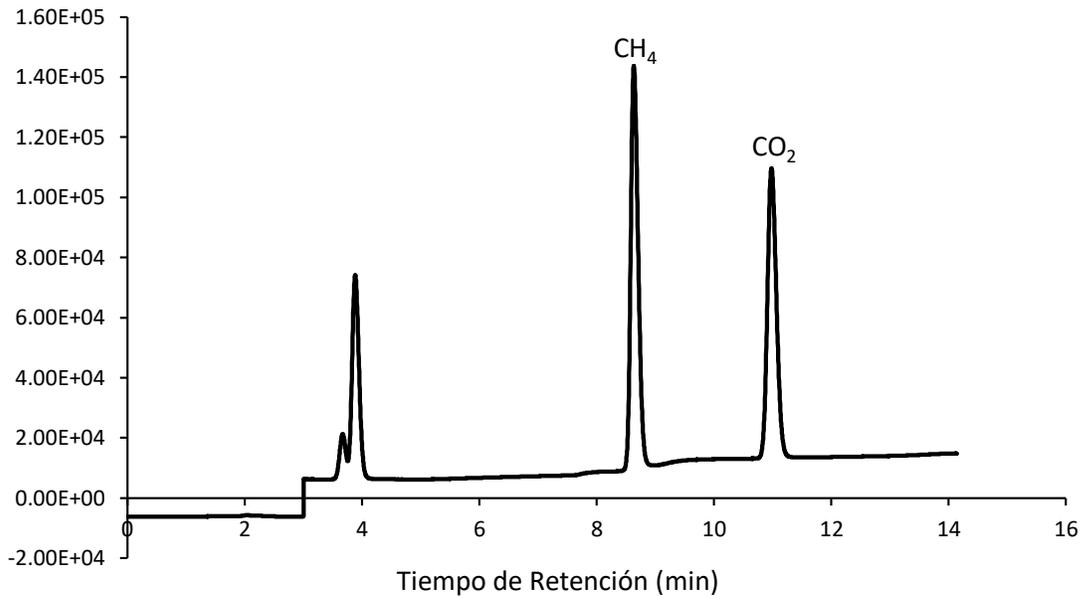
16-11-21



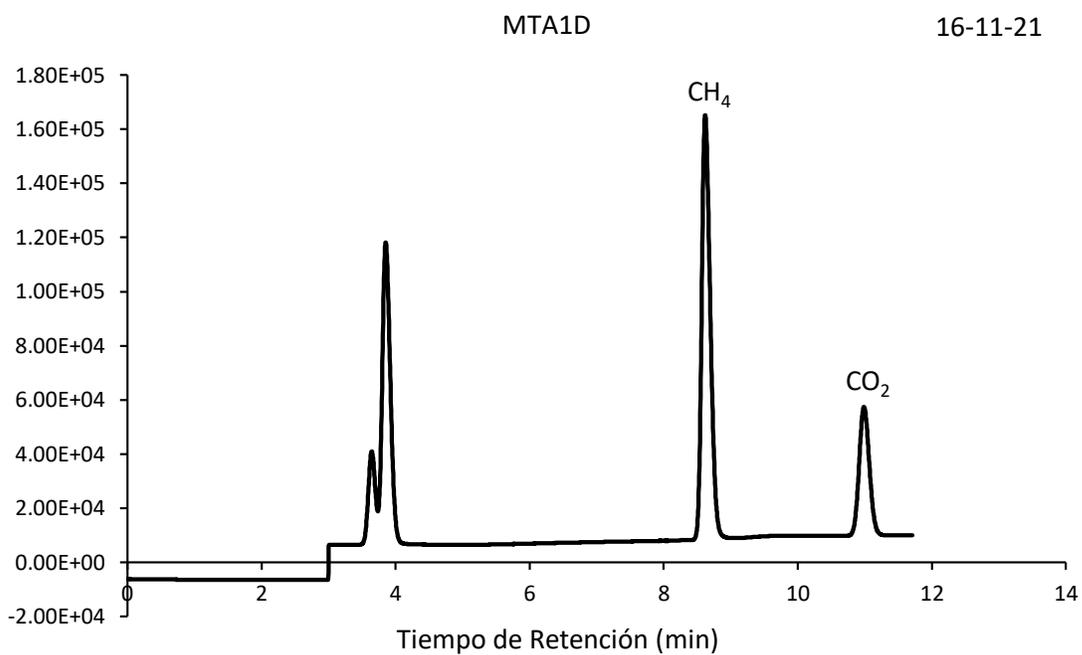
Muestra tomada en el municipio de General Zaragoza

MTA1

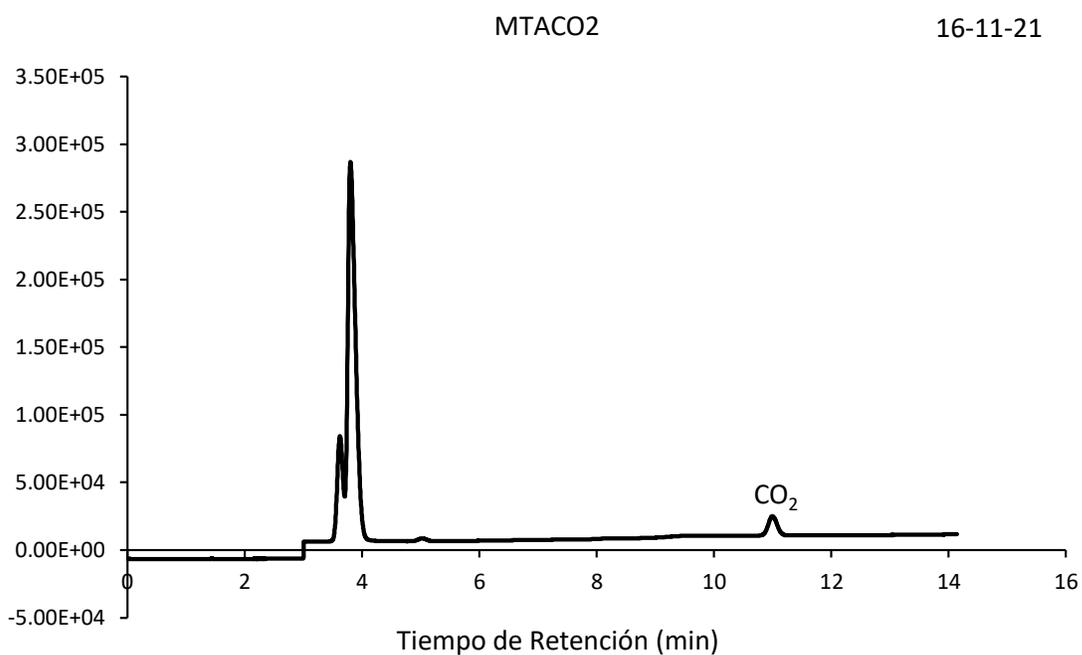
16-11-21



Muestra tomada en el municipio de General Zaragoza



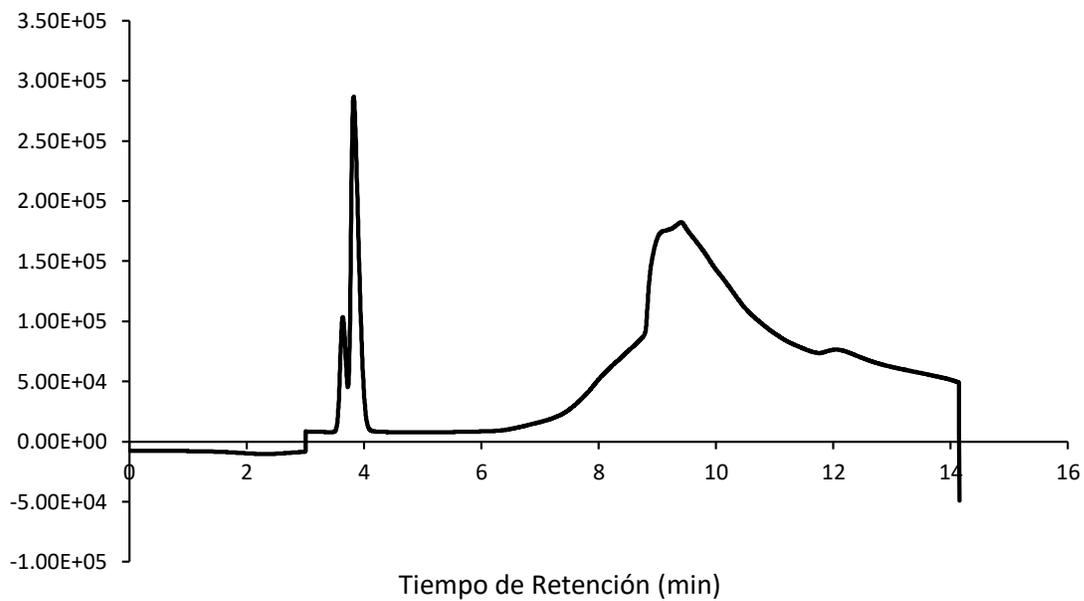
Muestra tomada en el municipio de General Zaragoza



Muestra de Blancos

BCO1

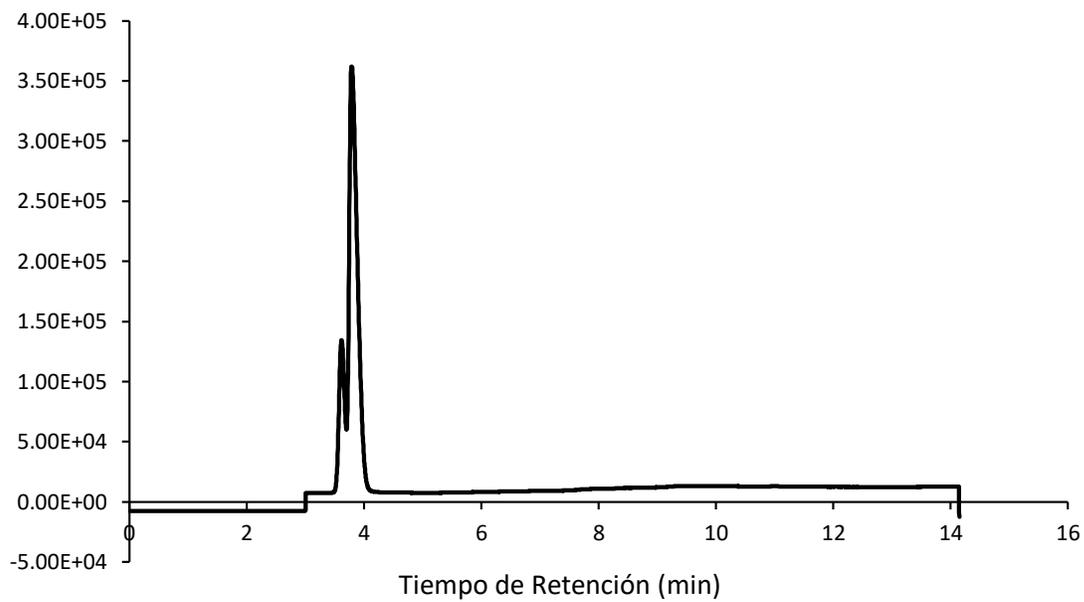
26-08-22



Muestra de Blancos

BCO2

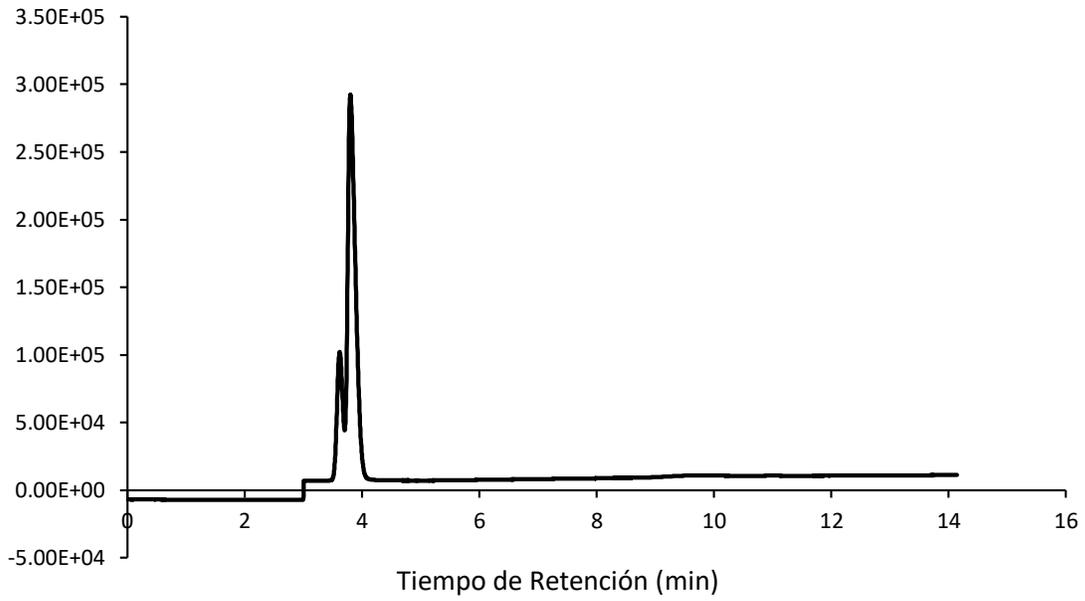
26-08-22



Muestra de Blancos

BCO3

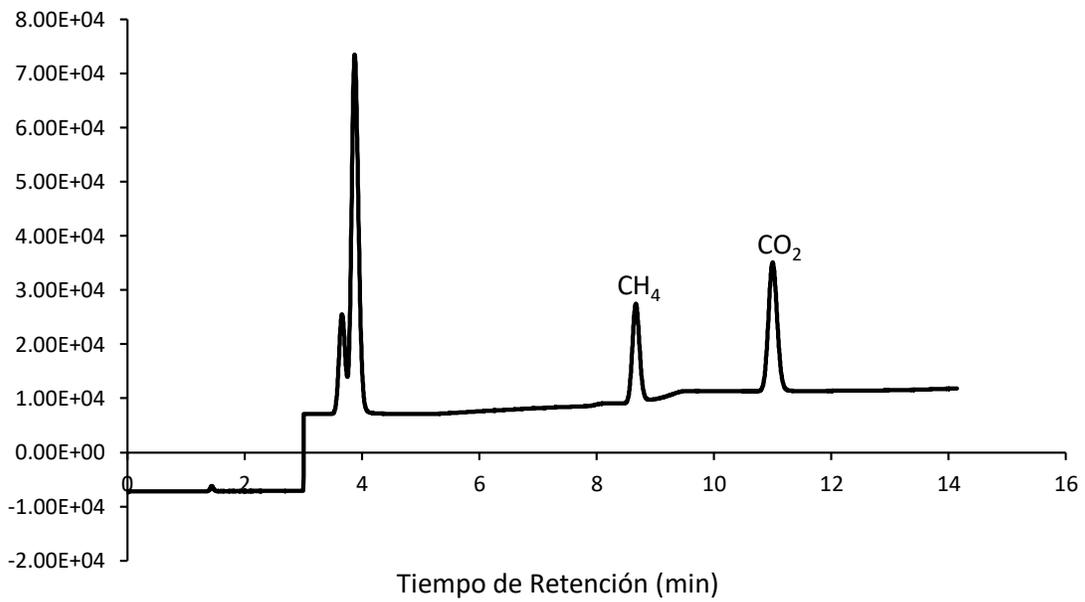
26-08-22



Estándar

EST01

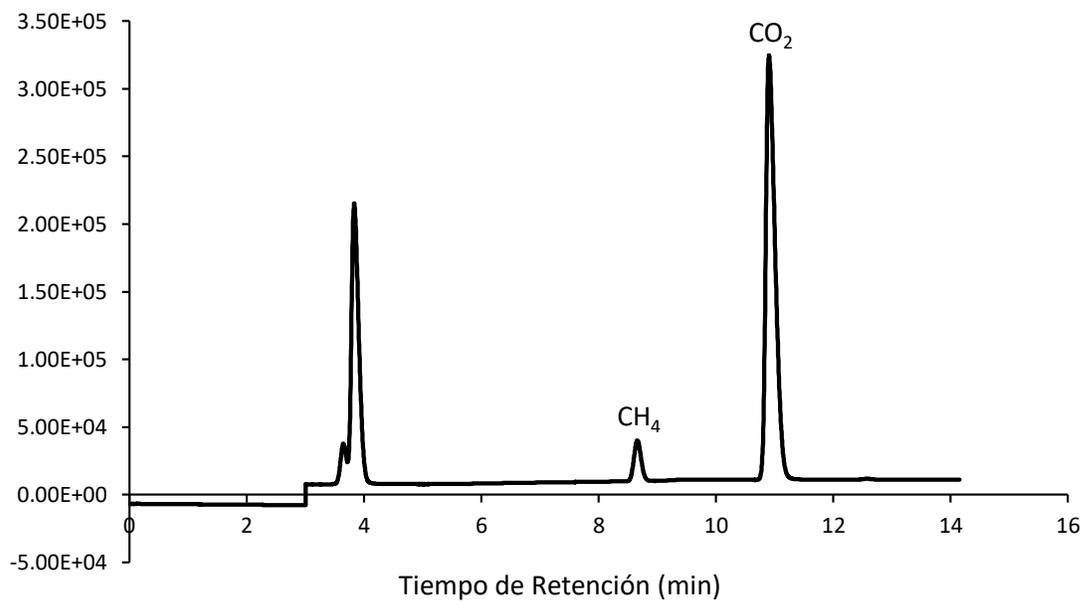
26-08-22



T4

25/75

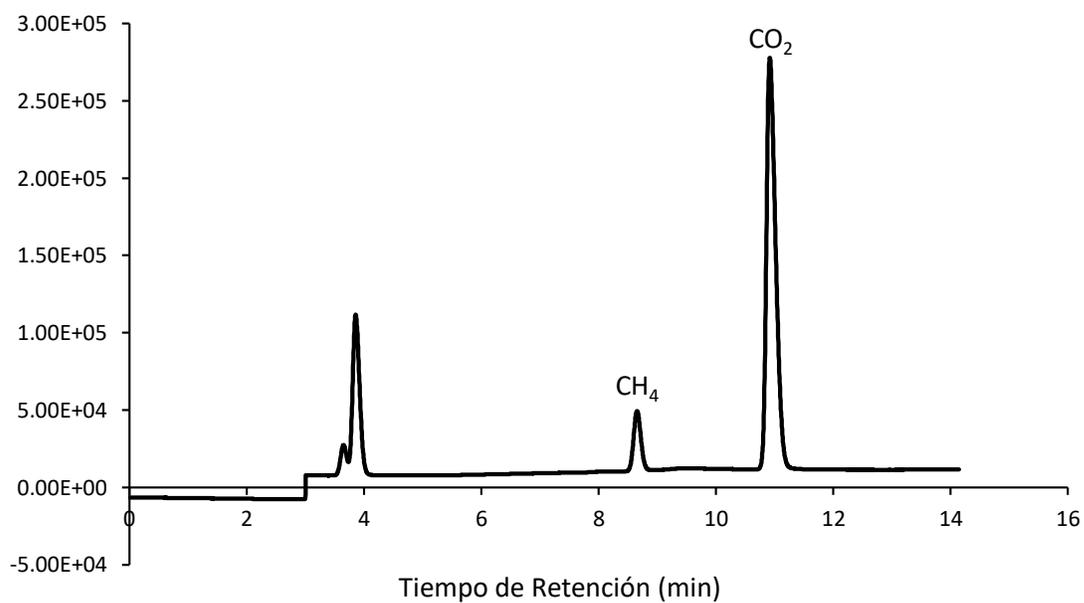
28-09-22



T4

75/25

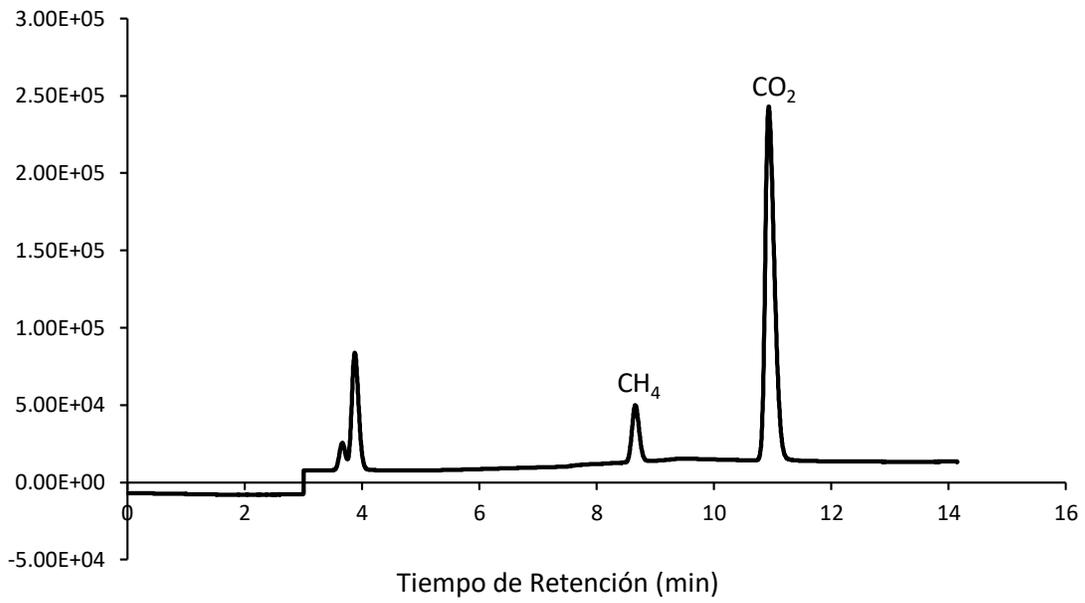
28-09-22



T3

50/50

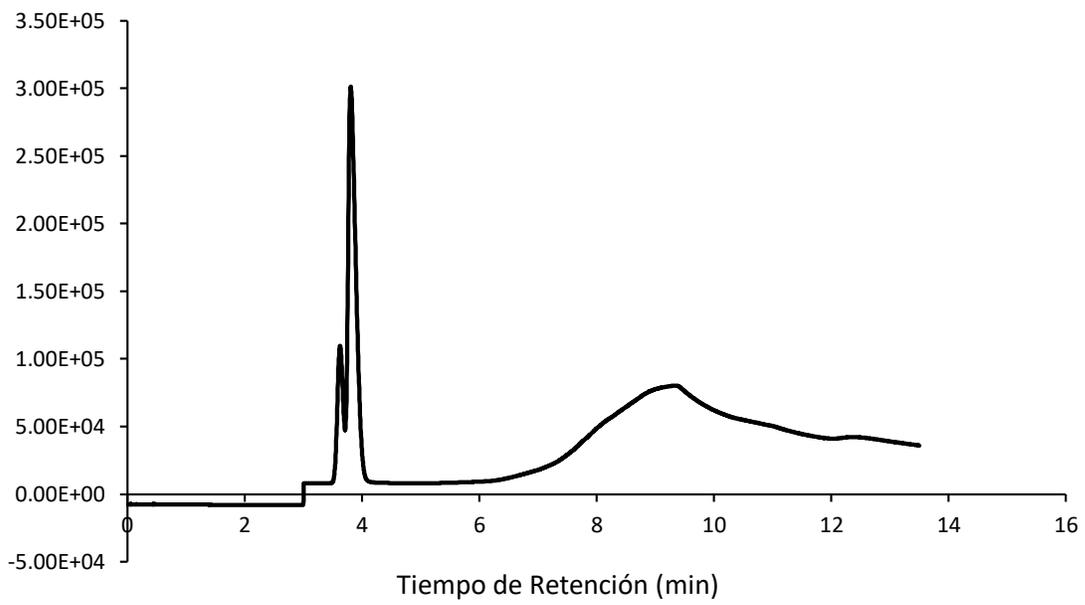
28-09-22



Muestra de Blancos

BCO1

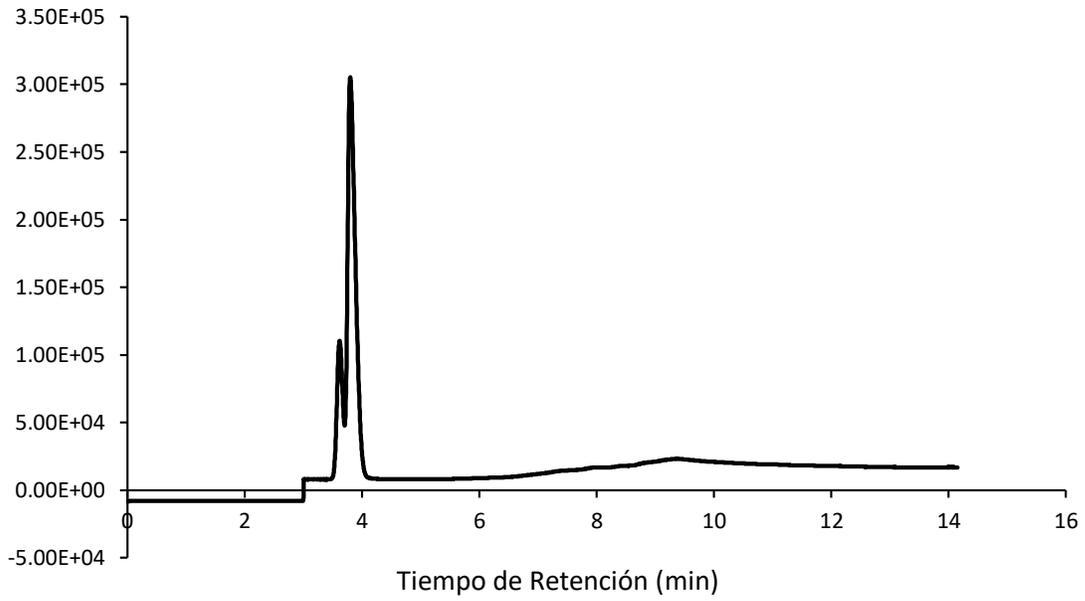
28-09-22



Muestra de Blancos

BCO2

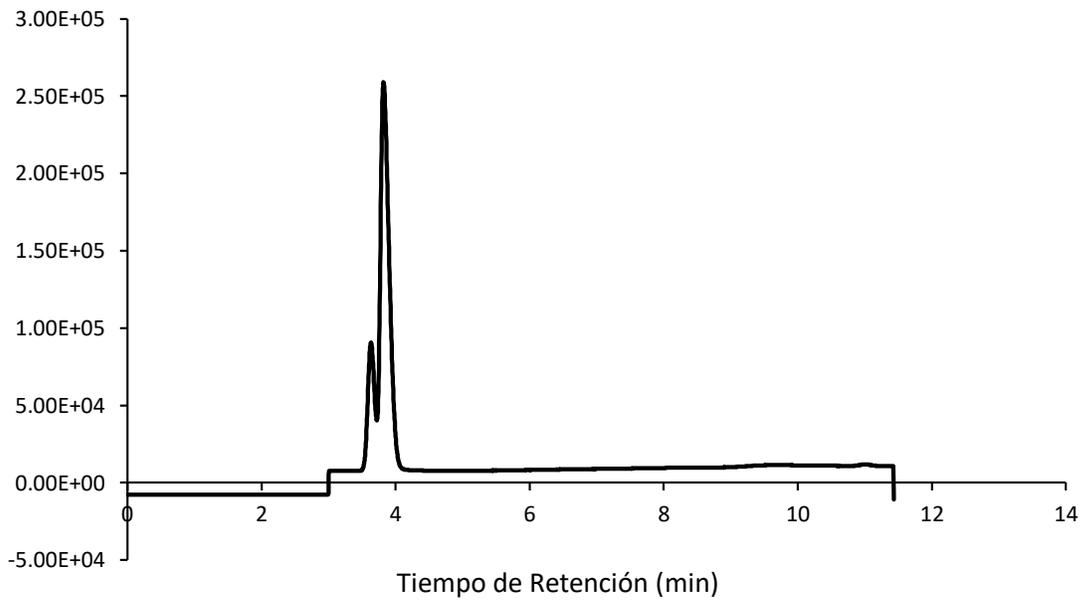
28-09-22



Muestra de Blancos

BCO3

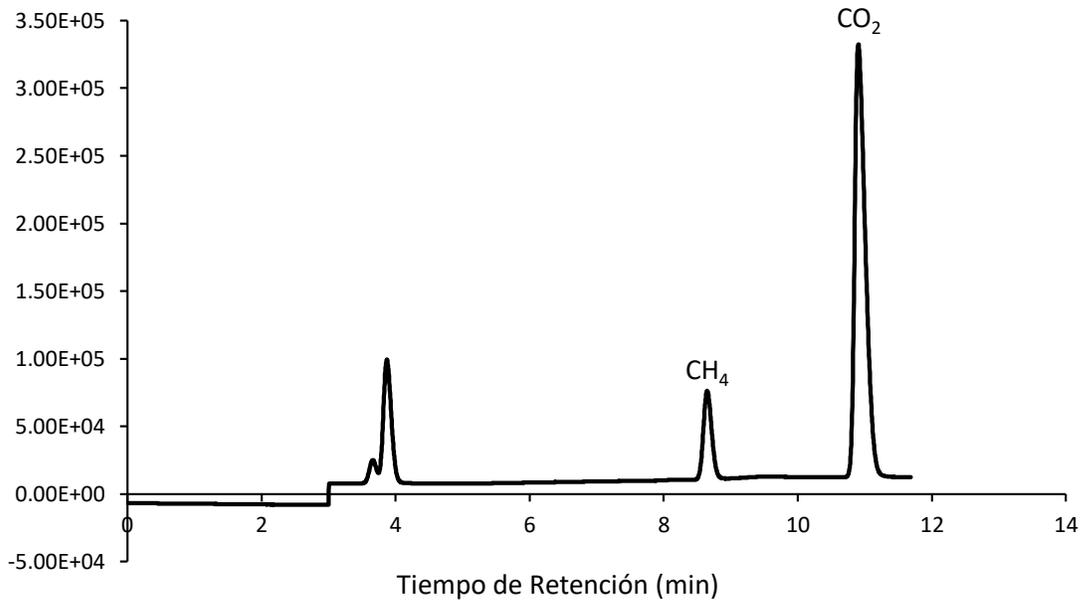
28-09-22



T1

C1

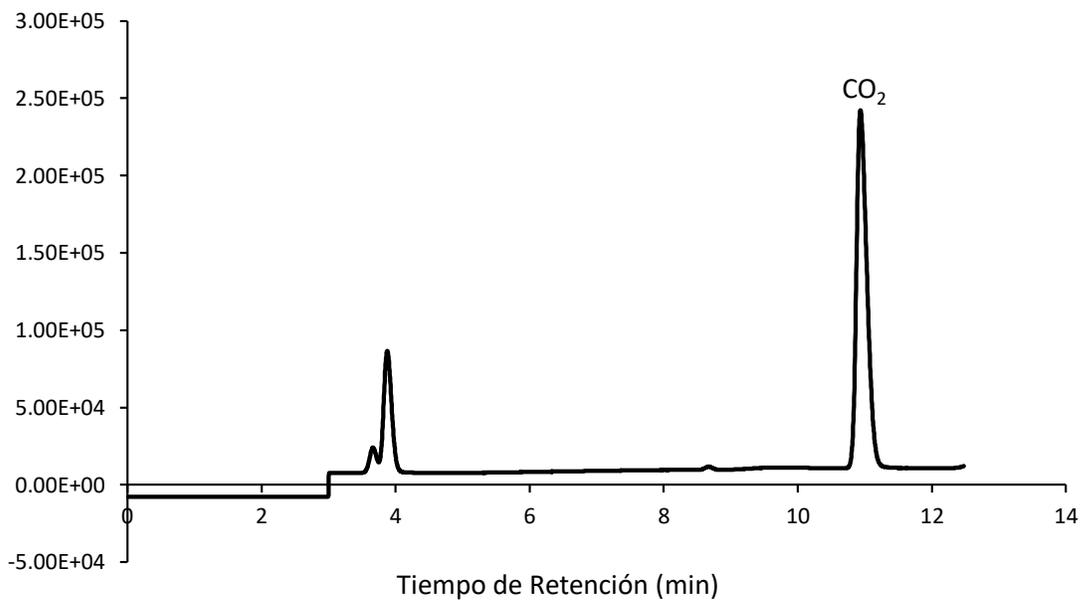
28-09-22



T5

N1

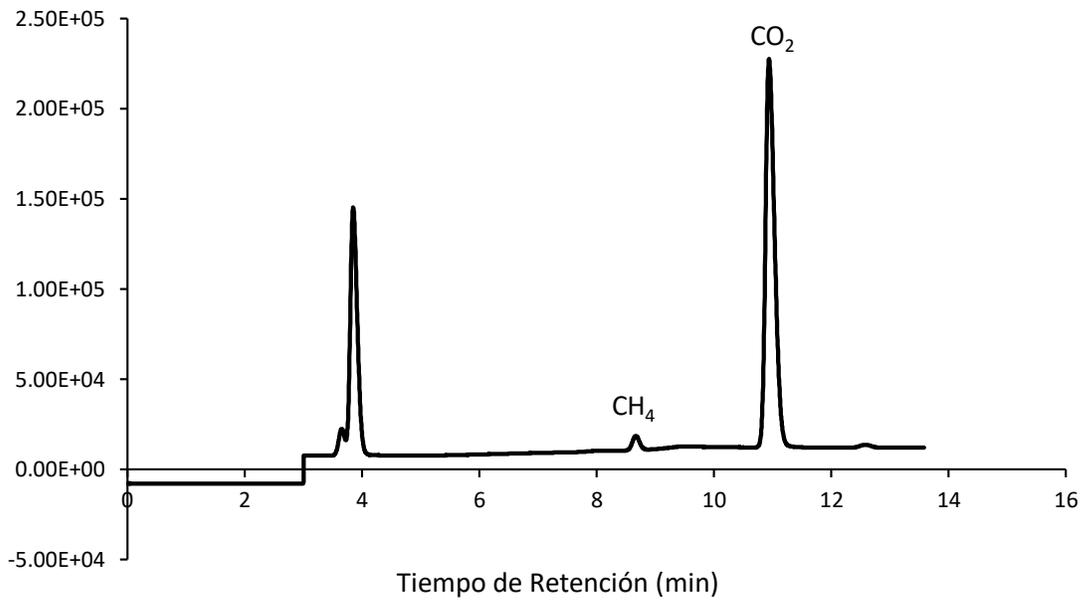
28-09-22



T5

NI

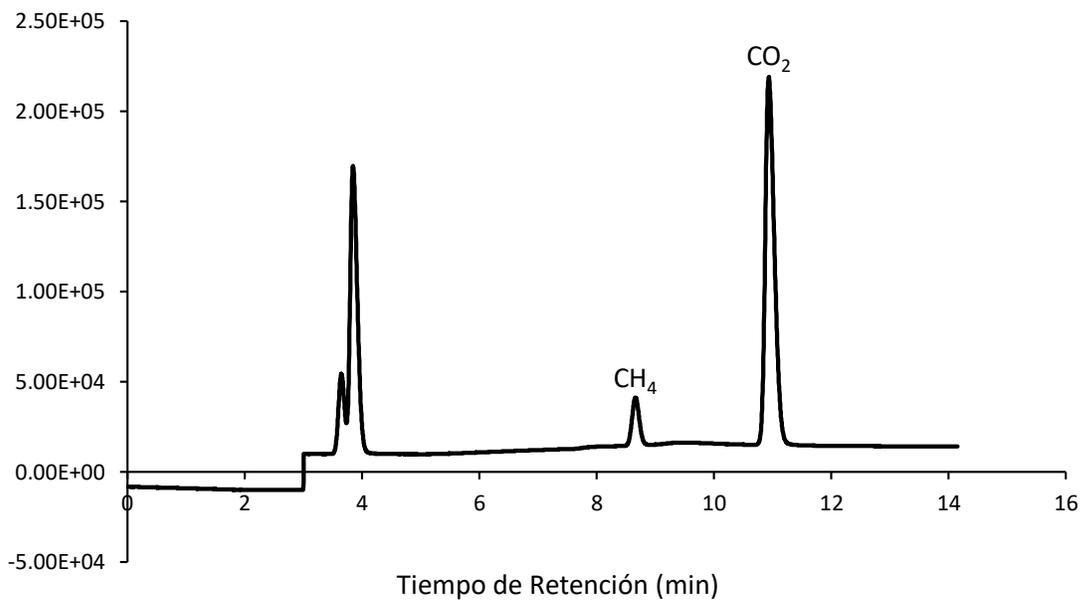
28-09-22



T3

50/50

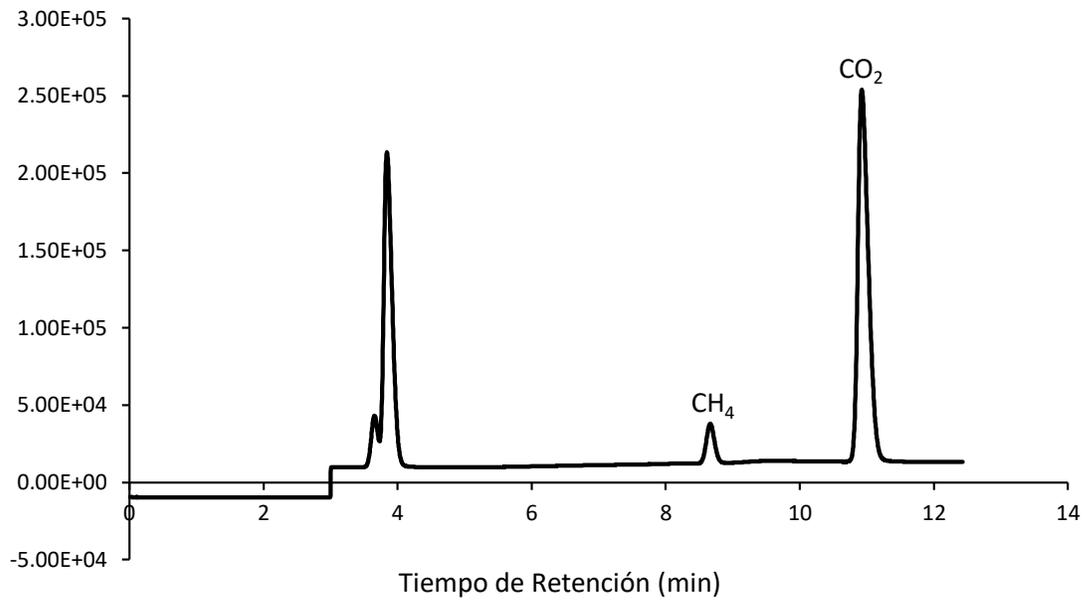
29-11-22



T4

25/75

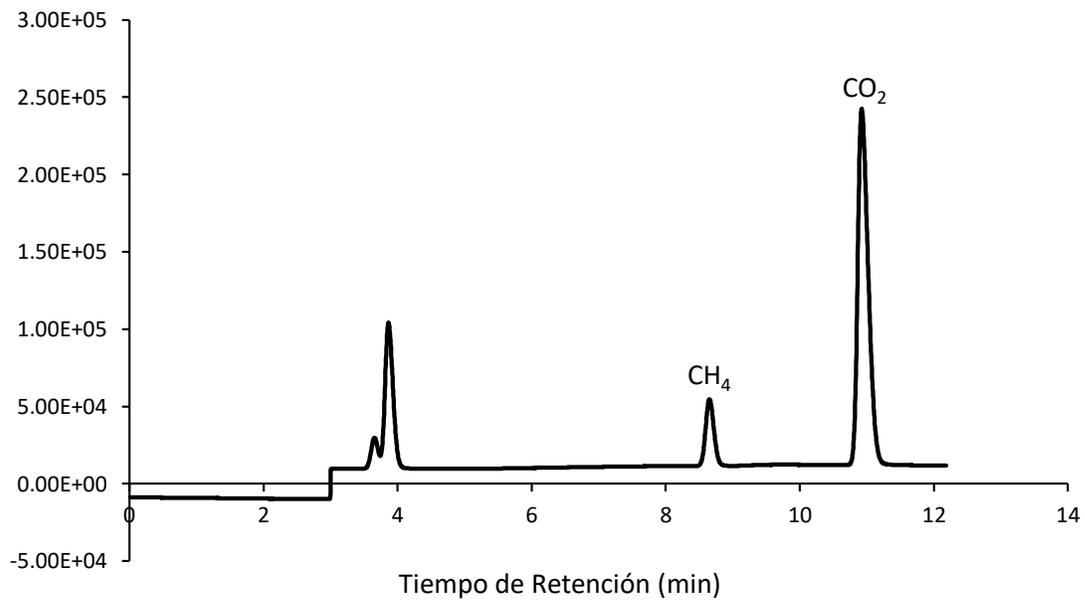
29-11-22



T2

75/25

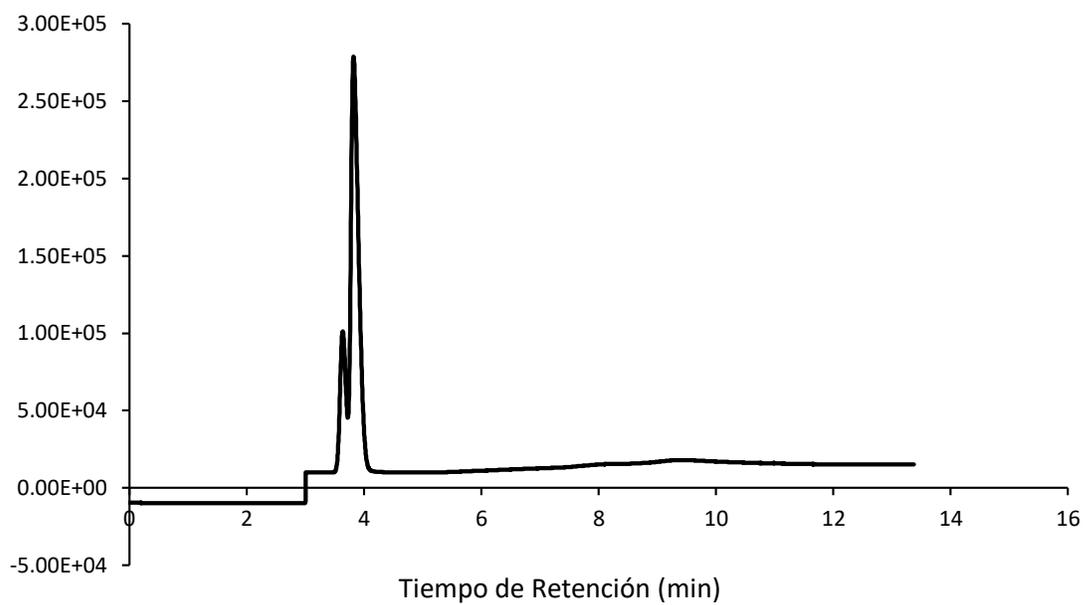
29-11-22



Muestra de Blancos

BCO1

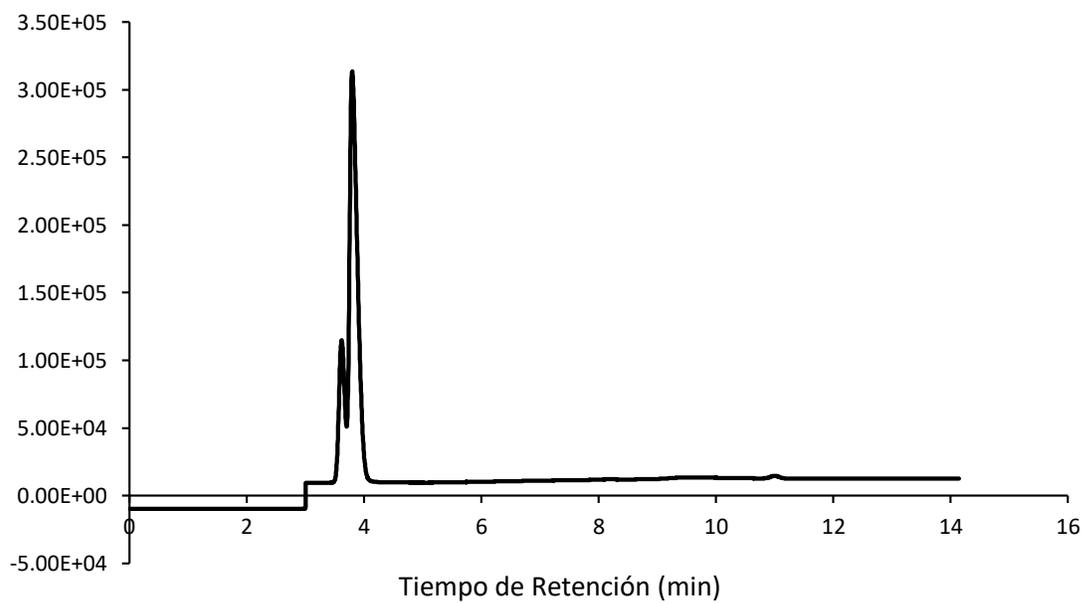
29-11-22



Muestra de Blancos

BCO2

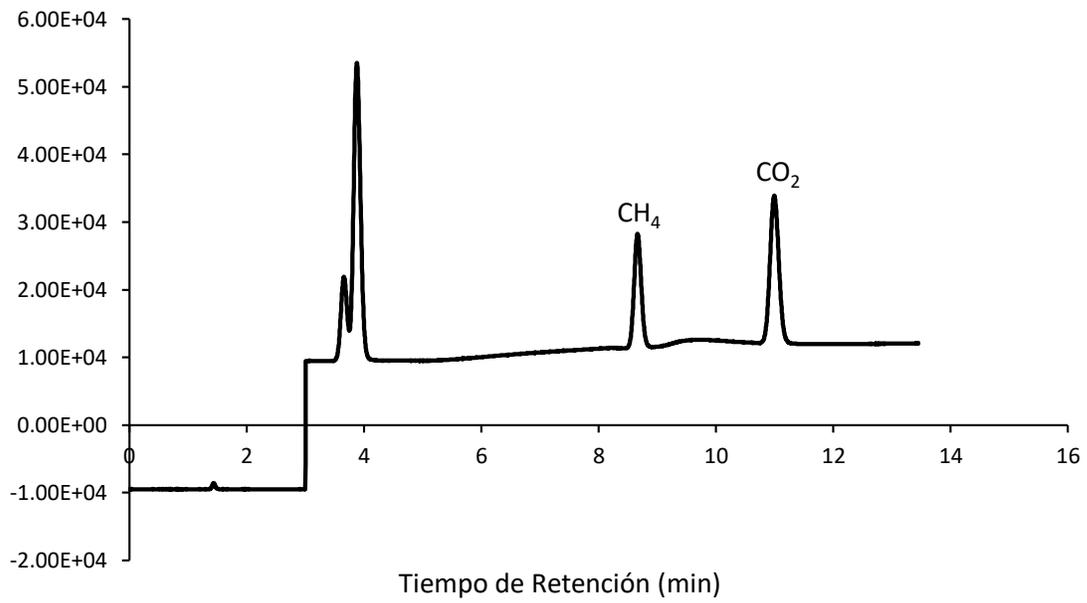
29-11-22



Estándar

ESTMIX

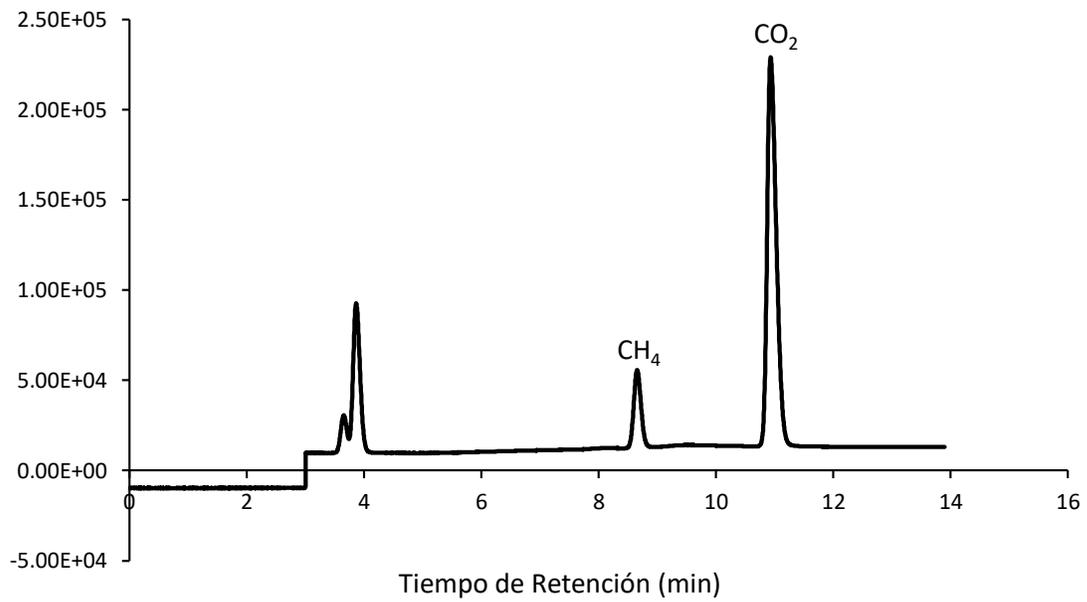
29-11-22



T3

NIC12

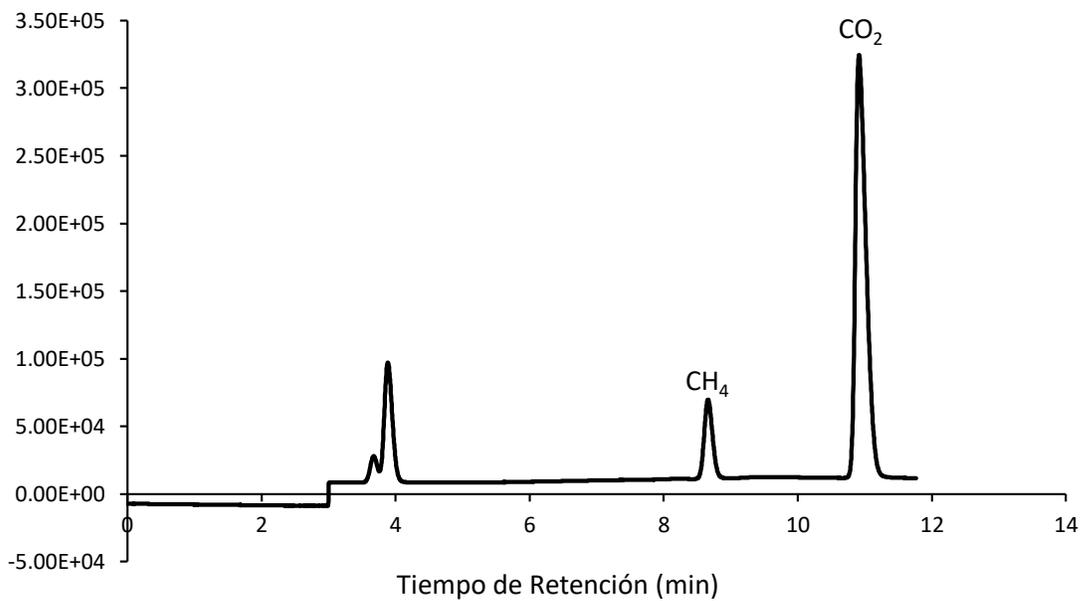
29-11-22



T2_35°C

25/75

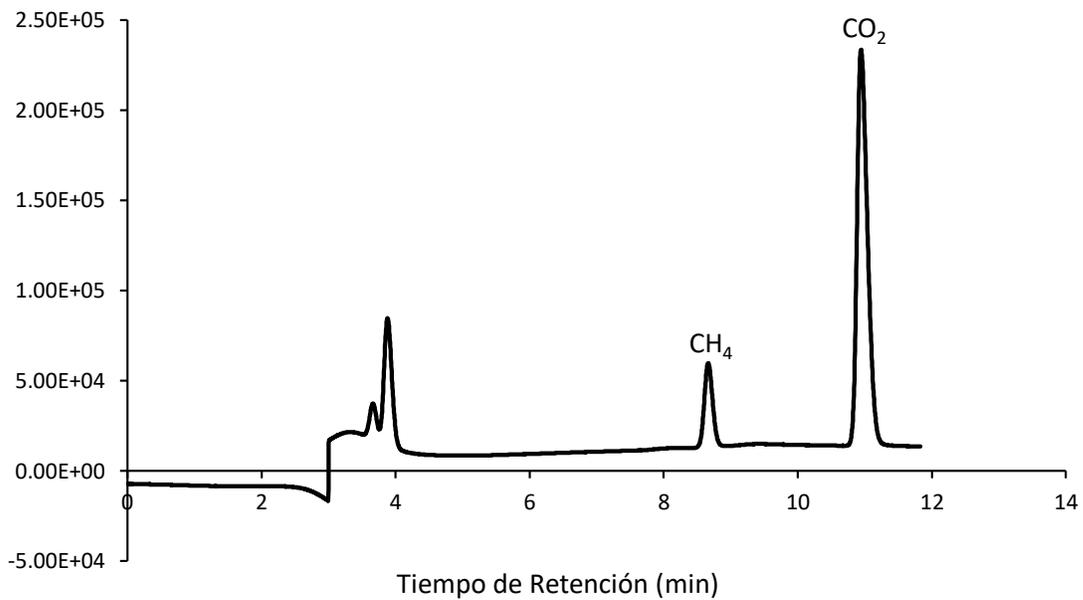
TEMP 35°



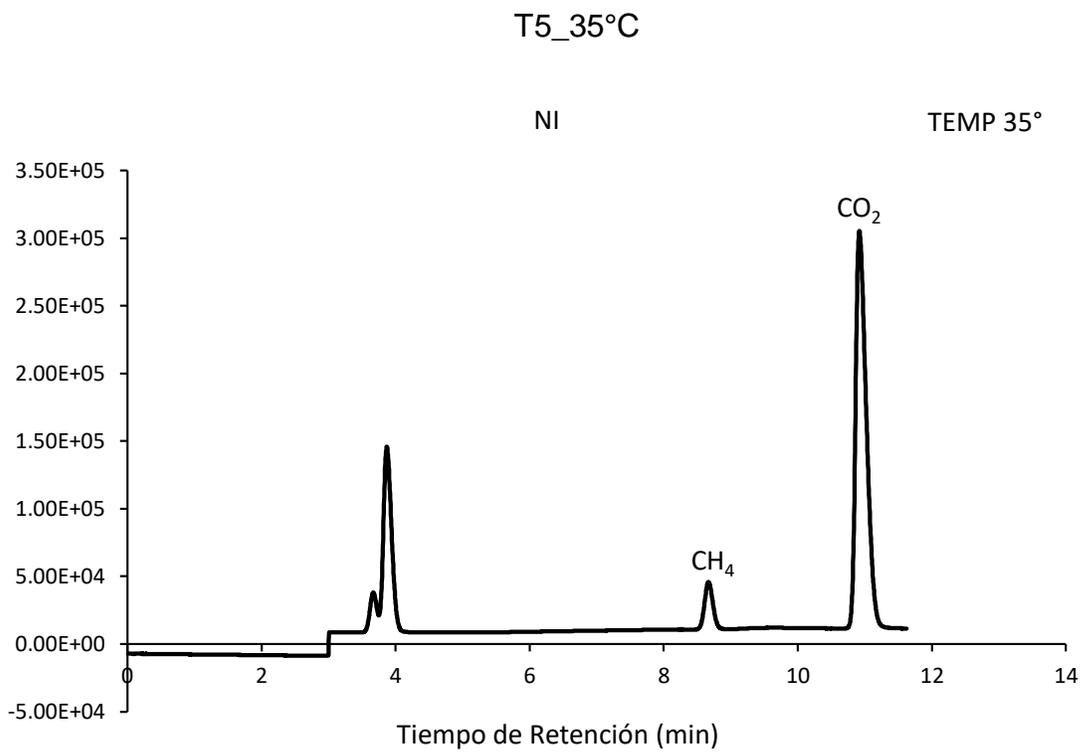
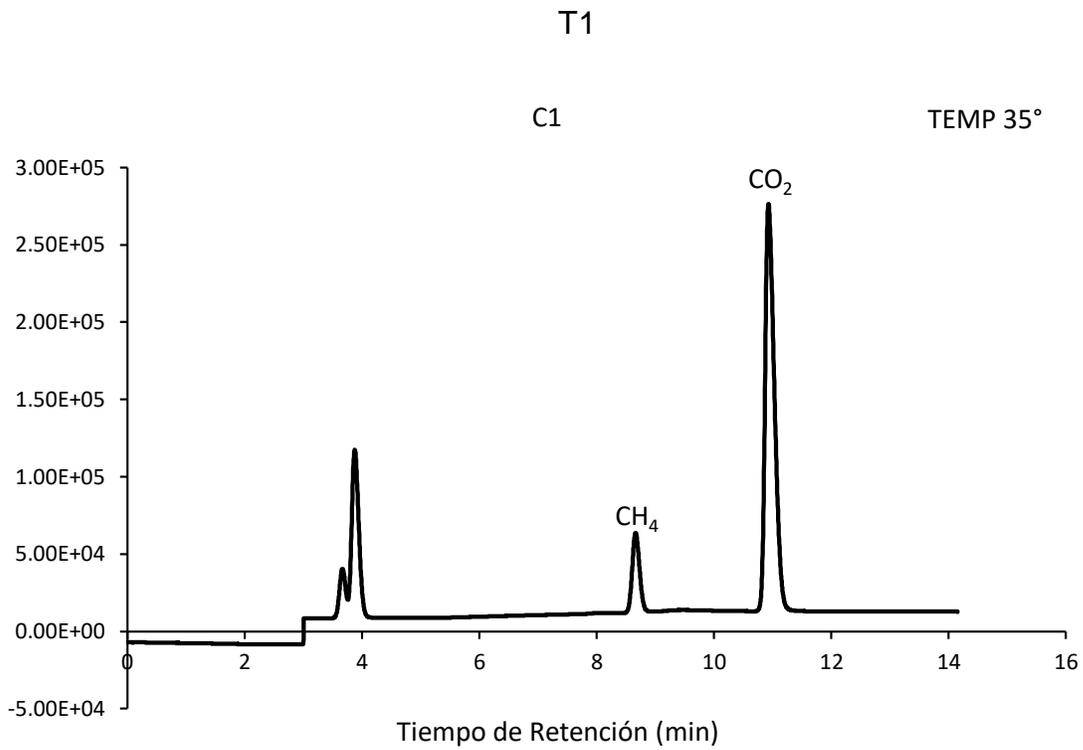
T4_35°C

75/25

TEMP 35°



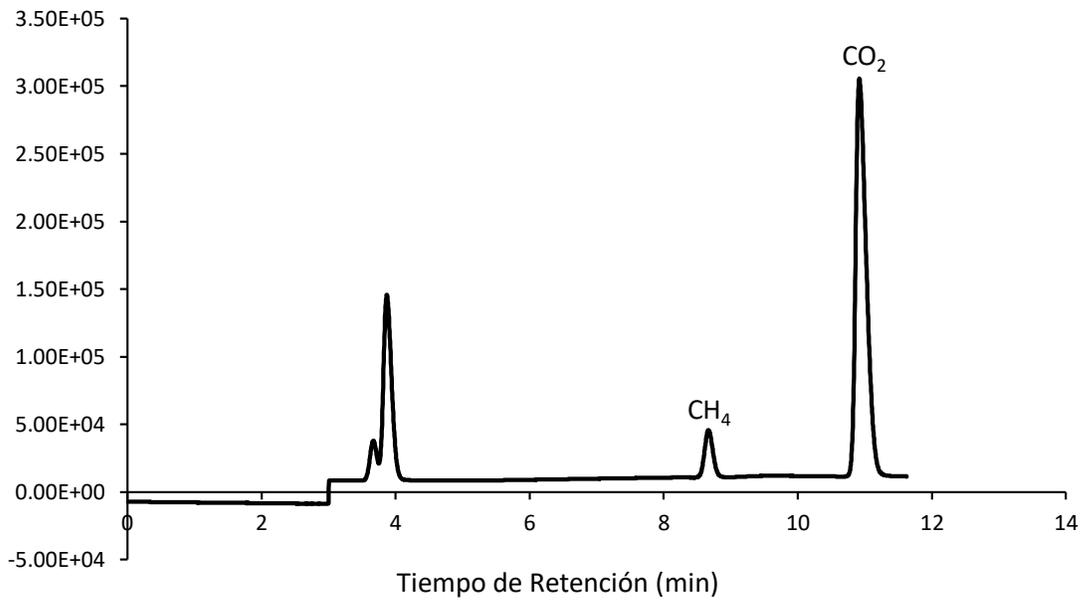
T1_35°C



T5_35°C

NIG

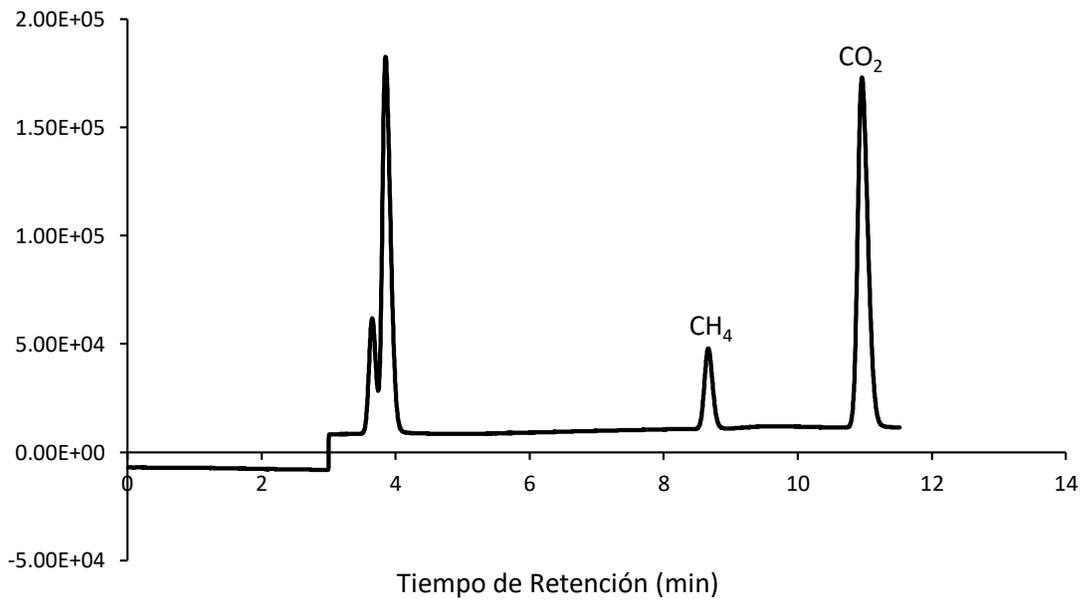
TEMP 35°



T3_35°C

50/50

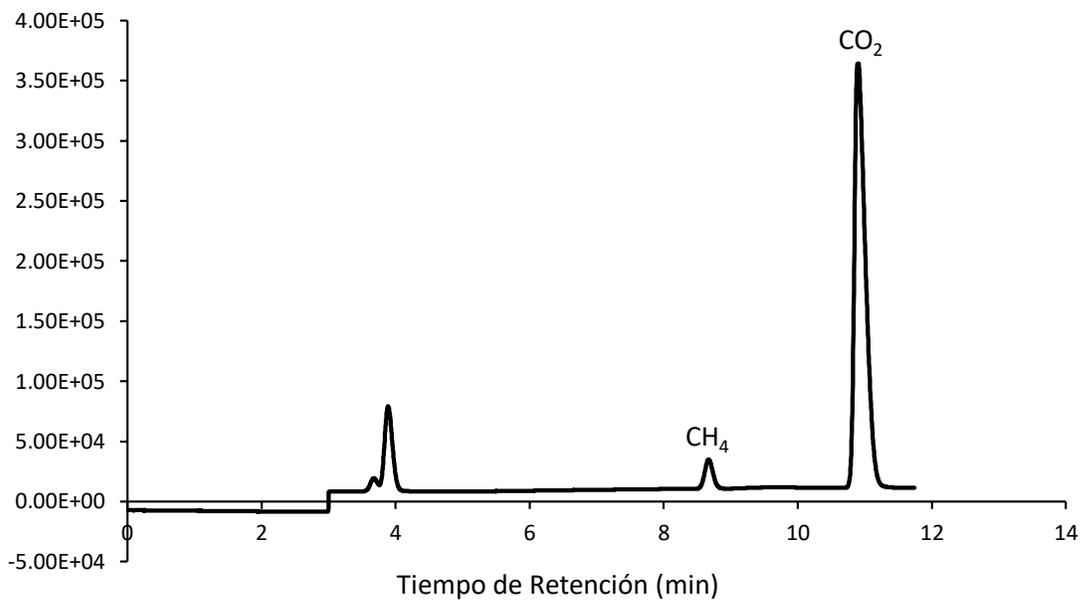
TEMP 35°



T2_40°C

25/75

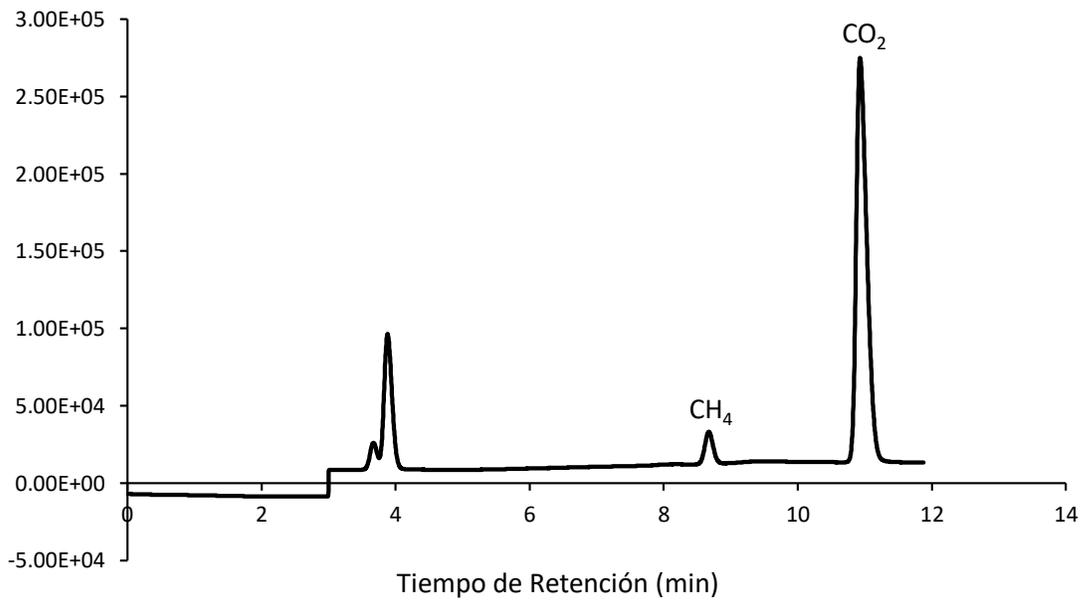
TEMP 40°



T3_40°C

50/50

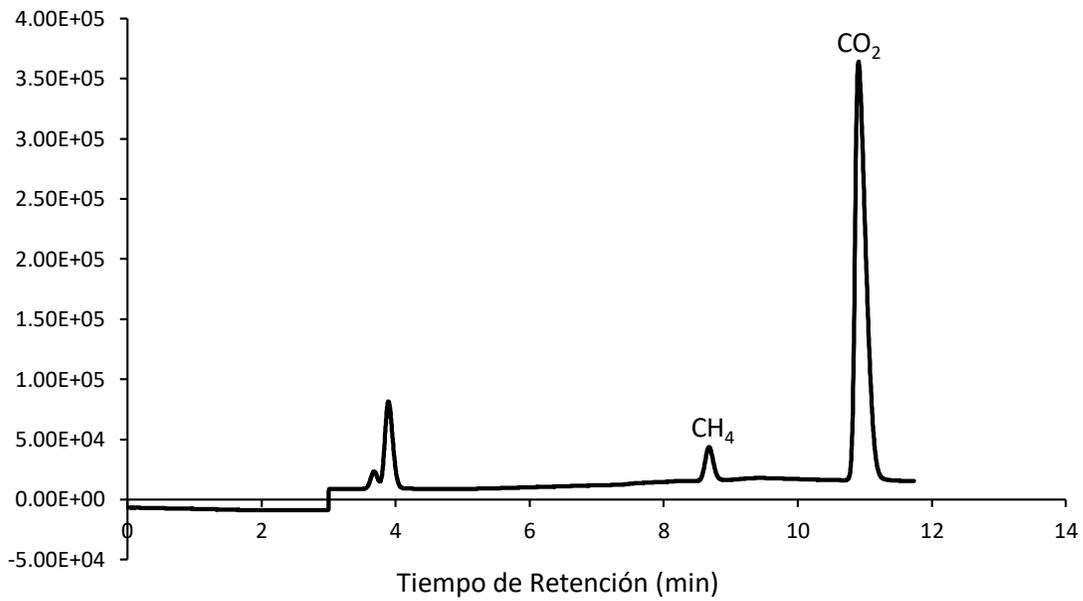
TEMP 40°



T4_40°C

75/25

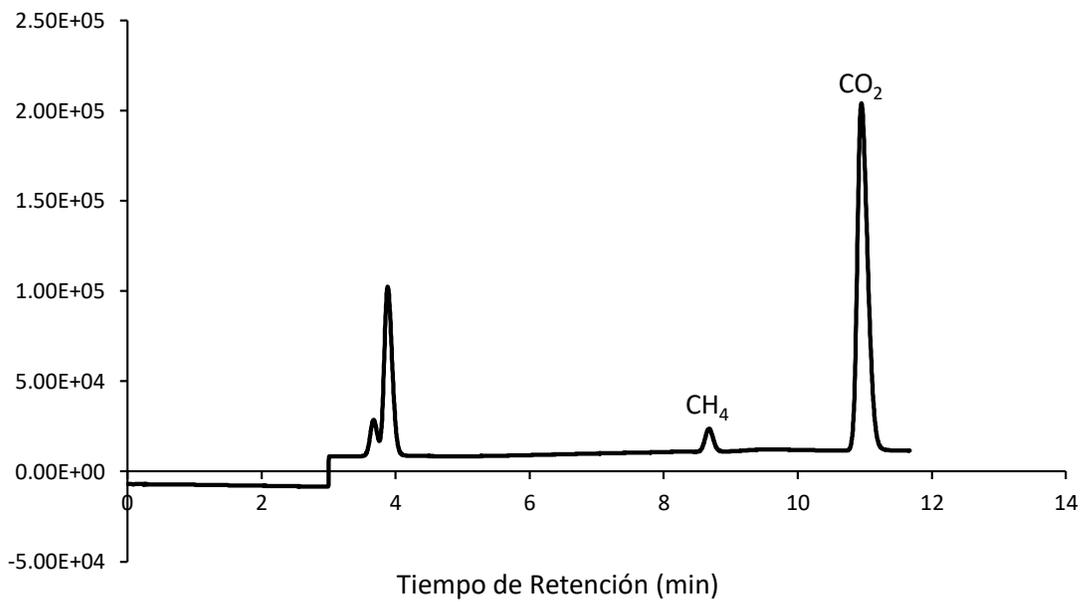
TEMP 40°



T5_40°C

NI

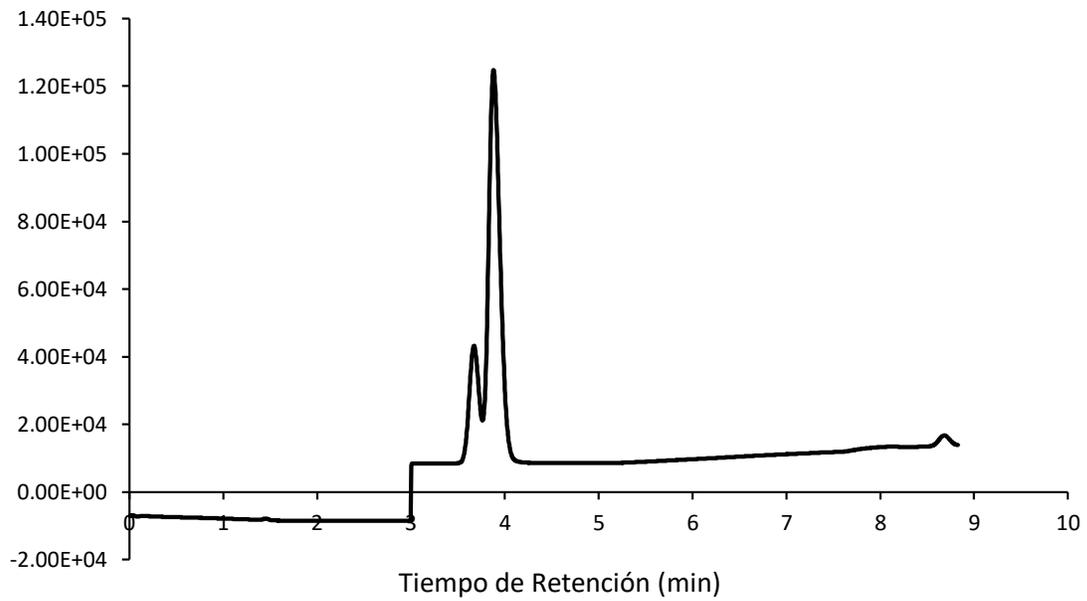
TEMP 40°



T1_40°C

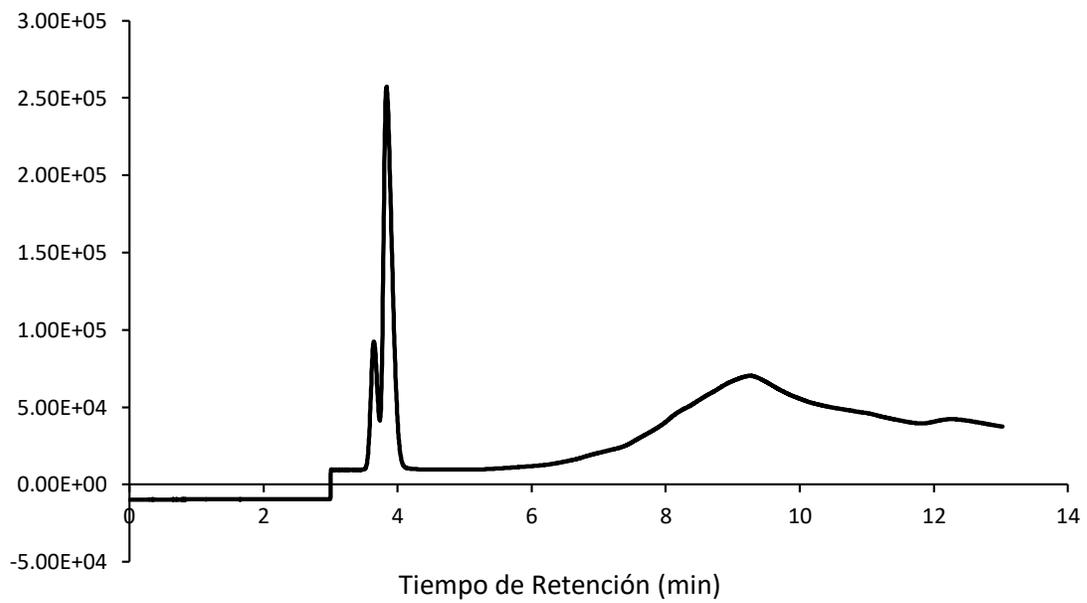
Cl

TEMP 40°



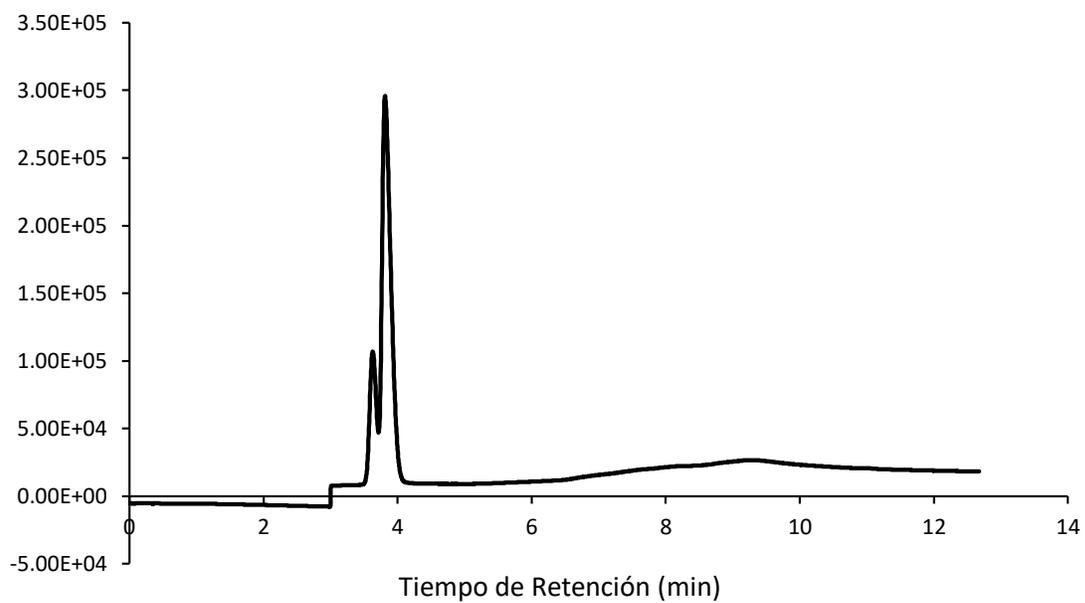
Muestra de Blancos

Bco1



Muestra de Blancos

Bco2



Anexo. 2

Parámetros de los modelos matemáticos realizados

Tratamiento 1_30°C

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	552.21	0.75	1.19				
FRIST-ORDER	552.21			0.29			
FITZHUGH	760.2			0.23	0.89		
CONE	552.2			0.74	1.18		
MONOMOLECULAR	552.21			0.29			
GOMPERTZ	522.86	104.41					
LOGISTIC	518.77	96.84				0	
TRANSFERENCE	552.21	157.59					
RICHARDS	523.32	0.01					0

Tratamiento 2_30°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	428.16	0.79	0.73				
FRIST-ORDER	428.16			0.38			
FITZHUGH	428.16			0.58	0.65		
CONE	558.53			0.36	0.86		
MONOMOLECULAR	428.16			0.38			
GOMPERTZ	412.04	106					
LOGISTIC	408.65	99.1				0	
TRANSFERENCE	428.16	160.78					
RICHARDS	412.03	0.01					0

Tratamiento 3_30°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	465.36	0.88	0.56				
FRIST-ORDER	465.36			0.24			
FITZHUGH	465.36			0.46	0.52		
CONE	930.04			0.08	0.7		
MONOMOLECULAR	465.36			0.24			
GOMPERTZ	432.34	74.55					
LOGISTIC	426.71	69.43				0	
TRANSFERENCE	465.36	110.61					
RICHARDS	432.35	0.01					0.0001

Tratamiento 4_30°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	399.98	0.89	0.41				
FRIST-ORDER	399.98			0.29			
FITZHUGH	399.98			0.5	0.57		
CONE	1188.07			0.02	0.52		
MONOMOLECULAR	399.98			0.29			
GOMPERTZ	378.45	75.97					
LOGISTIC	374.74	70.3				0	
TRANSFERENCE	399.97	114.5					
RICHARDS	378.45	0.01					0.0001

Tratamiento 5_30°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	414.69	0.77	0.68				
FRIST-ORDER	414.69			0.44			
FITZHUGH	414.69			0.62	0.7		
CONE	543.85			0.42	0.8		
MONOMOLECULAR	414.69			0.44			
GOMPERTZ	400.41	123.08					
LOGISTIC	396.84	116.88				0	
TRANSFERENCE	414.69	182.03					
RICHARDS	400.41	0.01					0

Tratamiento 1_40°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	454.77	0.21	4.9				
FRIST-ORDER	454.77			0.77			
FITZHUGH	454.77			0.83	0.93		
CONE	1248.99			0.02	0.3		
MONOMOLECULAR	454.77			0.77			
GOMPERTZ	441.51	284.51					
LOGISTIC	436.05	467.57				0.32	
TRANSFERENCE	454.77	349.67					
RICHARDS	441.42	0.2					0.0003

Tratamiento 2_40°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	451.79	0.63	0.71				
FRIST-ORDER	451.79			0.83			
FITZHUGH	451.79			0.86	0.97		
CONE	504.6			1.35	0.9		
MONOMOLECULAR	451.79			0.83			
GOMPERTZ	444.38	255.65					
LOGISTIC	438.97	334.69				0.19	
TRANSFERENCE	451.79	374.35					
RICHARDS	444.23	0.26					0.0004

Tratamiento 3_40°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	398.36	0.72	0.49				
FRIST-ORDER	398.36			0.79			
FITZHUGH	398.36			0.84	0.95		
CONE	434.21			1.27	1.03		
MONOMOLECULAR	398.36			0.79			
GOMPERTZ	391.88	213.41					
LOGISTIC	388.55	222.2				0.04	
TRANSFERENCE	398.36	316.59					
RICHARDS	391.87	0.28					0.0005

Tratamiento 4_40°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	303.96	0.64	0.62				
FRIST-ORDER	303.96			0.91			
FITZHUGH	303.96			0.9	1.01		
CONE	318.91			1.44	1.25		
MONOMOLECULAR	303.96			0.91			
GOMPERTZ	300.26	182.19					
LOGISTIC	296.99	250.08				0.24	
TRANSFERENCE	303.96	277.06					
RICHARDS	300.26	0.28					0.0006

Tratamiento 5_40°

MODELOS	P (ml)	μ_m (ml/d)	t_0 (d)	k (1/d)	n^*	γ (d)	v^*
BPK	308.62	0.96	0.06				
FRIST-ORDER	308.62			0.82			
FITZHUGH	308.62			0.85	0.96		
CONE	464.65			0.59	0.43		
MONOMOLECULAR	308.62			0.82			
GOMPERTZ	302.8	178.66					
LOGISTIC	298.47	262.73				0.23	
TRANSFERENCE	308.62	253.34					
RICHARDS	302.77	0.28					0.0006