

**ESTUDIO CINÉTICO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA
GALLINAZA DE JAULA EN LOS INTERVALOS PSICROFÍLICO Y
MESOFÍLICO DE TEMPERATURA SEGÚN LA CLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA**

**HENRY ARENAS ESPINOSA
JESSICA LORENA GUZMÁN CAMACHO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO CINÉTICO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA
GALLINAZA DE JAULA EN LOS INTERVALOS PSICROFÍLICO Y
MESOFÍLICO DE TEMPERATURA SEGÚN LA CLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA**

**HENRY ARENAS ESPINOSA
JESSICA LORENA GUZMÁN CAMACHO**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

**DIRECTORA
Liliana Del Pilar Castro Molano
Ingeniera Química, Ph. D.**

**CODIRECTOR
Humberto Escalante Hernández
Ingeniero Químico, M. Sc., PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

A Nuestra directora del Proyecto Dra. Lilibiana del Pilar Castro Molano, por brindarnos la oportunidad de trabajar con ella, por su tiempo, disposición y por sus aportes en el desarrollo de este trabajo.

A Nuestros compañeros de laboratorio, quienes con su compañerismo y paciencia contribuyeron en el desarrollo de la investigación

A Don Eduardo, Don Wilson y Don Guillermo por su colaboración incondicional y por su cooperación con los equipos.

Profesores, compañeros y trabajadores de la escuela de ingeniería química por contribuir en mi formación académica.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a Dios, mi Señor y redentor, a quien tanto amo; a la inmaculada Virgen María, quien me ofreció luz sobre luz y llevo mis suplicas a Jesús. Doy gracias a Dios por mis padres y hermanos, por el apoyo y amor que ellos me han dado. Aunque ahora no vea el sentido de esta etapa de mi vida como antes lo soñaba, de seguro me permitirá llegar al camino que Dios ha puesto en mi corazón. Deseo compartir pequeños fragmentos de algunos poemas que he escrito para mi Señor en los que yo llamaría: "los mejores instantes de mi vida".

"El alba se extiende a lo largo del horizonte sin oscuridad entre ella y las montañas, la bendición del señor se renueva en mi corazón cuando sus ángeles traen de nuevo la luz al mundo".

*"Sí te sientes desolado en la vida,
sí tu alma se ve rodeada de tinieblas,
sí solo queda en tu corazón el latido del dolor de cada día;
te queda tu Señor como refugio"*

*"Mi esperanza acuosa se va tan airosa
se la lleva la golondrina desvanecida
en su canto gemebundo,
en sus ojos enmohecidos
y en su pico de lirios
que cortaron las rosas
que sangraban en mi alma dolida"Henry Arenas E*

DEDICATORIA

A Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de esta etapa de vida que esta próxima a culminar espero ser digna por tan valioso esfuerzo.

A mi hermosa madre, por ser mi apoyo incondicional, por siempre confiar en mis esfuerzos y nunca haber soltado mi mano en este camino, por ser ella mi mayor motivación la mayor motivación de mis esfuerzos.

A mi padre por sus sabios consejos, por cada palabra de aliento, por todos los valores inculcados y por estar siempre presente en cada paso que di.

A mis hermanas, mis abuelos y el resto de mi familia quienes siempre confiaron en mí, quienes con cada palabra, cada sonrisa me daban energía, a ellos gracias porque siempre supe que iban a estar ahí ante cualquier necesidad.

A Yeyson, Henry, Jenny, Luz Dary, María, Lina, Karina, Vicky, Stefany, Andrés y al resto de compañeros y amigos que tuve la dicha de conocer en este arduo camino, a ustedes gracias por esas experiencias y recuerdos maravillosos que siempre llevaré en mi corazón

Jessica Lorena Guzmán Camacho

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	16
1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA.....	22
1.1. ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA.....	22
1.1.2. Características sustrato e inóculo.....	23
1.1.3. Puesta en marcha de los reactores anaerobios	25
1.1.4. Análisis químicos.....	26
1.2.3. Modelo de Chen y Hashimoto	27
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
2.1. ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA.....	29
2.1.1. Adaptación del inóculo a régimen psicrófilico.....	29
2.1.2. Análisis del rendimiento acumulado y la velocidad de producción de metano	30
2.1.2.1. Producción de metano en rango psicrófilico: 10°C y 20°C.....	30
2.1.2.2. Producción de metano en rango mesófilo: 25°C, 30°C, 35 °C, 37°C y 39°C	31
2.2 ANÁLISIS CINÉTICO.....	34

2.2.1. Predicción de la velocidad de la biodegradabilidad de la gallinaza de jaula (GJ)	41
2.2.2 Modelos empíricos para la predicción de la velocidad máxima de crecimiento específico de los microorganismos (μ_m), fase de latencia (λ) y la Velocidad máxima de Producción de metano ($R_{m\acute{a}x}$) en función de la temperatura	43
2.2.3. Análisis Método de diferencia significativa mínima (LSD) de Fisher	45
3. CONCLUSIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Grupos microbianos y ruta metabólica de la digestión anaerobia.....	16
Figura 2. Rendimiento acumulado de metano y velocidad de producción de metano para la DA de GJ a diferentes temperaturas.....	33
Figura 3. Rendimiento de metano acumulado predicho y experimental a diferentes temperaturas.....	40
Figura 4. Biodegradabilidad de la GJ a diferentes temperaturas. (a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico	42
Figura 5. Modelo empírico para la predicción de $\mu_{\text{máx.}}$ (1/día) de acuerdo al modelo de Chen y Hashimoto.....	44
Figura 6. Modelo empírico para la predicción de λ (días): (a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico	44
Figura 7. Modelo empírico para la predicción $R_{\text{máx.}}$ ($\text{m}^3 / \text{Kg SV día}$): (a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico	44

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Regiones Geográficas de Colombia con sus respectivas temperaturas ..	23
Tabla 2. Caracterización Físicoquímica de la GJ	23
Tabla 3. Protocolo de aclimatación del inóculo	24
Tabla 4. Caracterización físicoquímica del sustrato, inóculo e inóculo adaptado ..	29
Tabla 5. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo cinético de primer orden.....	36
Tabla 6. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo modificado de Gompertz	37
Tabla 7. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo Logístico..	38
Tabla 8. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo de Chen y Hashimoto.....	39
Tabla 9. Modelos empíricos para la predicción de $\mu_{\text{máx}}$, λ y $R_{\text{máx}}$ en función de la temperatura.....	45
Tabla 10. Diferencias Significativas entre rendimientos acumulados de metano a diferentes temperaturas	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Protocolo de Toma de muestra de Gallinaza de Jaula (GJ).....	59
ANEXO B. Clasificación Climática de Lang.....	60
ANEXO C. Distribución de la Temperatura Media Anual Promedio Multianual durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.....	61
ANEXO D. Distribución de la Temperatura Mínima Anual Promedio Multianual Durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.....	62
ANEXO E. Distribución de la Temperatura Máxima Anual Promedio Multianual Durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.....	63
ANEXO F. Determinación de la alcalinidad total, ácidos grasos volátiles y pH para la carga inicial y el efluente.....	64
ANEXO G. Determinación de DQO y la eficiencia de remoción de DQO para la carga inicial y el efluente.....	64
ANEXO H. Determinación de ST, SV y la eficiencia de remoción de ST, SV para la carga inicial y el efluente.....	65
ANEXO I. Determinación de los azúcares reductores totales (ART) para la carga inicial y el efluente.....	66

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO CINÉTICO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA GALLINAZA DE JAULA EN LOS INTERVALOS PSICROFÍLICO Y MESOFÍLICO DE TEMPERATURA SEGÚN LA CLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA

AUTORES: HENRY ARENAS ESPINOSA
JESSICA LORENA GUZMÁN CAMACHO**

PALABRAS CLAVES: Gallinaza de jaula, Digestión anaerobia, mesofílico, psicofílico, estudio cinético.

CONTENIDO:

En esta investigación se ha efectuado un estudio cinético de la generación de metano en la digestión anaerobia de la gallinaza de jaula (GJ) mediante los modelos cinéticos: primer orden, Chen y Hashimoto, modificado de Gompertz y logístico en los intervalos mesofílico y Psicofílico de temperatura, utilizando reactores batch a escala de laboratorio y operados a 10, 20, 25, 30, 35, 37 y 39 °C. La gallinaza de jaula utilizada en este experimento se sometió a estudios de caracterización y durante la experimentación se monitorearon variables como SV, ST, AGV, DQO, ART, pH y AT antes y después de la digestión anaerobia. Los parámetros cinéticos específicos de cada modelo fueron estimados en cada caso. El efecto de la temperatura en la producción de metano fue evaluado experimentalmente y comparado con los resultados del estudio cinético. Los resultados mostraron que el mayor rendimiento acumulado de metano y la mejor eficiencia de biodegradación se obtuvieron con el biorreactor operado a 39 °C. El modelo modificado de Gompertz y el modelo Logístico son los mejores para la predicción de la producción de metano a temperaturas mesofílicas y psicofílicas, respectivamente. Adicionalmente se simuló la cinética de biodegradabilidad anaerobia de la gallinaza de jaula en base a los modelos: modificado de Gompertz y logístico. Fueron propuestos tres modelos empíricos: para $R_{m\acute{a}x}(T)$ y $\lambda(T)$ en base al modelo modificado de Gompertz, y $\mu_{m\acute{a}x}(T)$ en base al modelo de Chen y Hashimoto; los cuales pueden significar una herramienta importante para el diseño y construcción de biodigestores dado la variabilidad de temperaturas que presenta Colombia.

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química. Director Liliana del pilar Castro Molano Ing. Química PhD. Codirector Humberto Escalante Ing. Químico Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF KINETIC ANAEROBIC DIGESTION PROCESS OF CHICKEN MANURE, IN THE PSYCHROPHILIC AND MESOPHILIC INTERVAL OF TEMPERATURE ACCORDING TO THE CLIMATE OF COLOMBIA*

AUTHORS: HENRY ARENAS ESPINOSA
JESSICA LORENA GUZMÁN CAMACHO**

KEY WORDS: Chicken manure, anaerobic digestion, mesophilic, psychrophilic, kinetic study.

CONTENT:

This research has made a kinetic study of the generation of methane in the anaerobic digestion of chicken manure (CM) using the kinetic models: first order, Chen and Hashimoto, modified Gompertz and Logistic in mesophilic and psychrophilic intervals of temperature, using laboratory-scale batch reactor and operated at 10, 20, 25, 30, 35, 37 and 39 ° C. The chicken manure used in this experiment were subjected to characterization studies and during experimentation variables as: VS, TS, VFA, COD, TRS, pH and TA were monitored before and after digestion. The specific kinetic parameters of each model were estimated in each case. The effect of temperature on methane production was experimentally evaluated and compared with the results of the kinetic study. The results showed that achieved maximum cumulative methane yield and better biodegradation efficiency were obtained with the bioreactor operated at 39 ° C. The modified Gompertz model and the logistic model are best for predicting the production of methane to mesophilic and psychrophilic temperatures, respectively. Additionally the kinetics of anaerobic biodegradation of chicken cage manure, based on the models were simulated: modified Gompertz and logistic. Three empirical models were proposed: $R_{max}(T)$ and $\lambda(T)$ based on the modified Gompertz model, and $\mu_{max}(T)$ based on the model of Chen and Hashimoto; which can be an important tool for the design and construction of bio-digesters, given the variability of temperatures that presenting in Colombia.

*Thesis

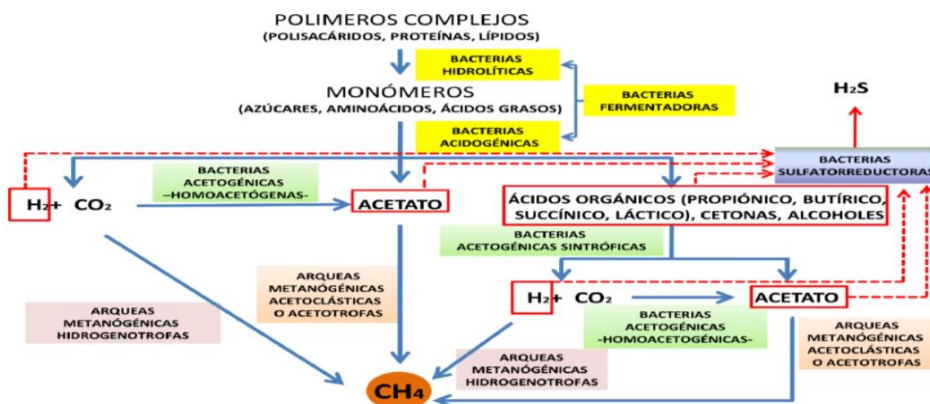
**Faculty of Engineering Physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Liliana del Pilar Castro Molano Chemical Engineer Ph.D. Co-director Humberto Escalante Chemical Engineer Ph.D

INTRODUCCIÓN

La Digestión Anaerobia (DA) es un proceso bioquímico complejo que involucra cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas son realizadas por consorcios microbianos conformados por diferentes poblaciones de microorganismos que pueden utilizar variedad de sustratos y que actúan en sintrofía. Los productos generados en una etapa constituyen el sustrato de otra, con lo cual el trabajo sinérgico de los grupos tróficos lleva a añadir la energía necesaria para mantener las células y además de liberar productos de gran interés industrial como el biogás y el digerido (Khanal., 2008).

Desde el punto de vista microbiológico, las actividades microbianas de la DA son desarrolladas por organismos de los dominios Bacteria y Archaea. El dominio bacteria comprende: bacterias fermentadoras hidrolíticas y acidogénicas, bacterias acetogénicas, que involucran homoacetógenas y sintróficas, hidrogenotróficas y metilotrofas (Madigan et al.,2004; Angelidaki et al.,2011) . Las interacciones y la ruta metabólica de la producción de metano se presentan en la Figura 1:

Figura 1. Grupos microbianos y ruta metabólica de la digestión anaerobia



Fuente: MADIGAN, M., MARTINKO, J., PARKER, J. (2004). Brock Biología de los Microorganismos, 10ª edición. Prentice-Hall, Madrid. 152, 448-451, 645-648, 930-931.

En los últimos años, la DA, se ha consolidado como un proceso sustentable. Por una parte, es una tecnología que contribuye a la estabilización de residuos mitigando el impacto ambiental de estos; y por otro lado, los productos del proceso anaerobio son: biogás rico en metano (utilizado como fuente de energía renovable, especialmente en zonas no interconectadas) y digerido, utilizado como biofertilizante con altas concentraciones de nitrógeno-fósforo-potasio (NPK). (Appels et al., 2011; Díaz et al., 2011; Mao et al., 2015). Actualmente diversos residuos han sido estabilizados por DA, siendo los estiércoles, lodos residuales y efluentes industriales los sustratos más utilizados a nivel mundial (Li *et al*, 2014).

Los procesos anaerobios son sensibles a la temperatura. En la naturaleza, el metano se forma en un amplio rango de temperatura (0 a 100 °C) (Anderson et al; 2003). En la profundidad de los glaciares (Berner et al., 1975), en los campos de hielo (0°C) (McGhee, 1968), en los sedimentos y pantanos (15.04 ° C), en el rumen (39 °C) y en las aguas termales (20 a 45 °C) (Stetter., 1985).

Dependiendo de la temperatura a la que el proceso se lleva a cabo, la DA de residuos orgánicos es básicamente de tres tipos: termofílica (45 -60 °C), mesofílica (20 – 45 °C) y psicofílica (T<20 °C). (Safley & Westerman., 1992).

La temperatura del proceso, puede afectar la velocidad de la biometanización y la ruta metabólica de la producción de metano al modificar la actividad y la concentración microbiana (Kotsyurbenko et al., 2007). A bajas temperaturas (T<20 °C) la hidrólisis es la etapa limitante del proceso; se reduce la velocidad de degradación anaerobia y la ruta metabólica para la producción de metano es la vía metanogénesis acetoclástica (Lokshina & Vavilin., 1999 ; Kotsyurbenko., 2005; Nozhevnikova et al., 2007). Según los estudios realizados con lodos anaerobios incubados a diferentes temperaturas, los rendimientos acumulados de metano más altos se alcanzan en el rango mesofílico (0,20 - 0,50 m³ CH₄ /Kg SV), mientras que en el rango psicofílico (0,10 - 0,14 m³ CH₄/Kg SV) (Nozhevnikova et

al: 2001b); lo que conduce a la suposición de que la metanogénesis se lleva a cabo por las comunidades mesofílicas que aún están activas en los intervalos de temperatura psicrófilos. Investigaciones realizadas en Moscú y Syktyvkar demostraron que la metanogénesis es dependiente de la temperatura (Nozhevnikova et al., 2001a ;Nozhevnikova et al., 2001b) .Sin embargo, se ha obtenido evidencia de comunidades metanogénicas psicrófilas en sedimentos de lagos profundos (4 a 5°C)(Nozhevnikova et al. 2003)

El proceso de digestión anaerobia a diferentes temperaturas ha sido estudiado a escala laboratorio alcanzando producciones de biogás en *batch* entre (0,18 a 0,50 m³ / Kg SV) a 36 °C (Razaviarani et al., 2013); (0,14 a 0,47 m³ / Kg SV) a 30 °C (Deepanraj et al., 2015) y (0,02 a 0,26 m³ / Kg SV) de 15 a 25 °C (Kafle & Chen., 2015).

Algunos investigadores han estudiado los efectos de la temperatura sobre la producción de biogás utilizando diferentes sustratos; encontrándose que la eficiencia de degradación de sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST) y demanda química de oxígeno (DQO) aumentan de manera significativa al incrementarse la temperatura (El-Mashad et al., 2004; Zhang et al., 2005; Vanegas & Bartlett., 2013; Ghatak & Mahanta, 2014); no obstante se reportó en la digestión anaerobia de residuos de alimentos, que la máxima eficiencia de degradación de DQO (45,72 %), SV (56,51 %) , ST (54,36 %) se encontró a 50 °C; a temperaturas superiores a 50 °C se observó que la eficiencia de degradación disminuye progresivamente (Deepanraj et al, 2015).

El modelamiento cinético del proceso anaerobio es un enfoque aceptado para describir los parámetros específicos del rendimiento del sistema. Los resultados de los modelos cinéticos obtenidos de los estudios experimentales se pueden utilizar para la estimación de la eficiencia del manejo de los reactores a escala completa con las mismas condiciones operativas en *batch*. El modelo cinético de

primer orden es el modelo más simple, en el cual se asume la hidrólisis como la etapa limitante de la velocidad en la digestión anaerobia y con base a esto, los investigadores lo han usado para modelar datos de PBM (potencial de biometanización) en *batch*, obteniéndose interpretaciones valiosas sobre la cinética de hidrólisis (Nopharatana et al., 2006; Pommier et al., 2007). El modelo modificado de Gompertz (Gibson et al., 1987) y el modelo Logístico son funciones que describen el rendimiento acumulado de metano en digestores *batch* asumiendo que la producción de metano es una función del crecimiento bacteriano en términos de las velocidades de crecimiento exponencial y la duración de la fase de latencia (Nopharatana et al., 2006; Pommier et al., 2007). El modelo de Chen y Hashimoto (Chen y Hashimoto, 1978, 1980) ha sido reconocido como una herramienta confiable en las predicciones cinéticas con respecto a la digestión anaerobia de los desechos con contenido sustancial de sólidos totales (ST) (Fongsatitkul et al., 2012). Los modelos cinéticos mencionados anteriormente se han aplicado con éxito para el estudio cinético sobre el efecto de la temperatura en la DA en operación *batch* para diversos sustratos. (Ma et al., 2013) utilizó los modelos de primer orden y Chen y Hashimoto para la DA de estiércol vacuno a temperaturas psicofílicas; (Kafle & Kim., 2012) utilizaron los modelos de Chen y Hashimoto, primer orden, y modificado de Gompertz para la DA de estiércol de cerdo a temperaturas mesofílicas; (Deepanraj et al, 2015) utilizaron el modelo modificado de Gompertz y el modelo Logístico para la DA de residuos alimenticios a temperaturas mesofílicas y termofílicas.

Si bien es cierto, hasta hace algunos años se consideraba que los sistemas de tratamiento anaerobios solo eran eficientes operando a temperaturas elevadas, en la última década se han llevado a cabo importantes esfuerzos para extender la aplicabilidad de esta tecnología al rango psicofílico (Singh & Viraraghavan., 2003; Perrigault et al., 2012).

Estos avances en la investigación han permitido instalar digestores anaerobios donde la temperatura del reactor varía con la temperatura ambiente y con calefacción solar. En climas fríos como Bolivia, donde las máximas temperaturas se registran entre 15°C y 20°C, se han instalado reactores tubulares de bajo costo concluyendo que la tecnología de digestión anaerobia contribuyó a la reducción de pobreza energética por el suministro de biogás (0,7 a 0,8 m³ de biogás por día) y a mejorar la agricultura sostenible con el digerido (Martí et al., 2014).

Particularmente, el clima de Colombia está determinado por aspectos geográficos y atmosféricos que generan un amplio mosaico de climas y microclimas, que van desde los más calurosos (> 35°C) en las costas y llanuras hasta los más fríos (temperaturas bajo 0 °C en los picos de las montañas de la Cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta). La población rural Colombiana usa ampliamente la leña para fines energéticos, especialmente para la cocción de los alimentos; las mujeres y los niños en algunos lugares viajan más de 5 km y pasan cerca de 4 horas al día recogiendo leña, esta actividad genera un grave impacto sobre los bosques locales, la erosión del suelo, el agotamiento de fuentes hídricas y la aparición de enfermedades como la neumonía infantil, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y el cáncer de pulmón. Según (Surendra et al; 2014) la leña representa el 54% de la deforestación en los países en desarrollo, y en el mundo es responsable del 17 a 25% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) antropogénicas.

Por otro lado, en Colombia, el decreto 1713 de 2002 sobre el plan de gestión integral de residuos sólidos expide en sus artículos 70 y 72 las formas de aprovechamiento de los residuos como: la generación de biogás y la recuperación de energía.

Uno de los sectores agroindustriales con mayor crecimiento a nivel nacional es la avicultura. Como consecuencia, el sector ha incrementado la generación de

residuos orgánicos poniendo interés en el manejo adecuado de sus aguas residuales, cascaras de huevos, aves muertas y estiércol generados durante la explotación (Salminen & Rintala., 2002).

La industria avícola nacional genera en promedio 3.436.204 ton/año de gallinaza obtenida de explotaciones en piso (gallinaza de piso) y jaula (gallinaza de jaula) (Escalante et al., 2010). La gallinaza de jaula (GJ), resulta de las deyecciones, plumas, residuo de alimento y huevos rotos, que caen al piso y se mezclan. Este tipo de gallinaza tiene un alto contenido de humedad y altos niveles de nitrógeno principalmente en forma de proteínas (70%) y ácido úrico (30%) (Abouelenien, et al., 2014). Investigaciones anteriores demuestran que es posible producir biogás a partir de GJ alcanzando rendimientos de 0,43 CH₄/Kg SV a 36,5 °C (Kafle & Chen., 2015) y 0,58 m³ CH₄/Kg SV a 39°C (Marín et al., 2015),

En síntesis, el proceso de biometanización en los rangos mesofílicos y termofílicos se encuentra bien documentado. Sin embargo, existen limitaciones sobre el proceso a temperaturas psicofílicas, particularmente para la degradación anaerobia de la gallinaza de jaula. Por otra parte, para evaluar la aplicación de la tecnología anaerobia en Colombia se requiere conocer el potencial de biometanización (PBM) de la gallinaza a las diferentes temperaturas que presenta el país. El PBM es un ensayo de biodegradabilidad anaerobia en batch que determina el rendimiento de la producción de metano y se expresa como m³ CH₄/Kg SV (Palatsi et al., 2009).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación fue realizar una evaluación cinética en función de la biodegradabilidad anaerobia y la producción de biogás para la digestión anaerobia de gallinaza de jaula en rangos de temperatura psicofílica y mesofílica.

1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

1.1. ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA

Los ensayos de biodegradabilidad anaerobia se llevaron a cabo de acuerdo con el protocolo establecido por (Angelidaki et al .,2009).

1.1.1. Selección de las temperaturas de digestión anaerobia.Las temperaturas a las cuales se llevaron a cabo los experimentos de degradación anaerobia, fueron seleccionadas con base a las diferentes temperaturas ambiente que presenta el territorio colombiano. Según la clasificación climática de Lang o factor de lluvia de Lang (el cual se basa en el valor obtenido para cada región al dividir la precipitación total anual en milímetros, por la temperatura media anual en grados centígrados), propuesta por Richard Lang (1955), el territorio Colombiano presenta los siguientes climas: Desértico, árido, semiárido, húmedo y supe húmedo, tal como se presenta en el anexo B (IDEAM., 2011, IDEAM., 2014 a).

Colombia está dividida en 5 regiones geográficas (Pacífica, Amazonas, Andina, Orinoquía y Caribe), en cada región se presentan diferentes temperaturas a lo largo del año, por tal razón los tres parámetros que describen la temperatura en un lugar determinado son la temperatura media, la máxima media y la mínima media a nivel medio multianual. En el anexo C, D y E, se puede observar la distribución de la temperatura: máxima anual promedio multianual, mínima anual promedio multianual y media anual promedio multianual, respectivamente, durante el periodo 1981-2010. República de Colombia año 2014 (IDEAM., 2014 b).

Tabla 1. Regiones Geográficas de Colombia con sus respectivas temperaturas

Región Geográfica	T de referencia seleccionada (°C)
Caribe	30,35,37
Pacífica	25,30,35, 37, 39
Andina	10, 20, 25, 30, 35, 37, 39,
Orinoquía	25, 30, 35, 37, 39
Amazonas	20, 25, 30,35

De acuerdo a lo anterior, la digestión anaerobia de la GJ se llevó a cabo a las temperaturas de 10 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 37 °C y 39 °C. Para la temperatura de 10°C los experimentos se dispusieron en una nevera , para la temperatura de 20 °C, se dispuso de una cámara de enfriamiento; a 30°C y 35°C , los experimentos se llevaron a cabo en dos baños termoestados, y para las temperaturas de 37 °C y 39 °C se emplearon dos incubadoras.

1.1.2. Características sustrato e inóculo

Tabla 2. Caracterización Físicoquímica de la GJ

Parámetro	Unidad	GJ
pH	-	7,5
DQO	g/L	198,0
ST	g/L	224,7
SV	g/L	116,9
SV/ST	-	0,52
AGV	mg/L	16,680
Carbohidratos	%	35,2
Proteínas	%	15,8
Lípidos	%	1,2
C/N	-	10,8
NAT	mg/L	843,5

(%) Porcentaje en base seca

Como sustrato se empleó gallinaza de jaula recolectada de la granja Avícola Bellavistas Horizontes, ubicada en el municipio de Los Santos – Santander. El protocolo ejecutado para el muestreo se presenta en el anexo A. La caracterización de la gallinaza se presenta en la tabla 2:

La fuente de inóculo utilizada fue estiércol bovino recolectado en el frigorífico, (este inóculo fue pre incubado a 25°C para reducir el contenido de materia orgánica residual). La composición del inóculo fue 777mg DQO/L, 28,2 g ST/kg muestra y 65% de SV (tomado como una fracción de los ST).

La actividad metanogénica del inóculo fue de 0,6 gDQO/gSSV día. El recuento de grupos tróficos metanogénicos (Número más probable de células por concentración de inóculo (NMPcélulas/gSSV) fue el siguiente: arqueas metanogénicas acetoclásticas $2,8 \times 10^4$, arqueas metanogénicas hidrogenotróficas $2,3 \times 10^4$, arqueas metanogénicas del metanol $2,9 \times 10^4$) (Alzate & Quintero, In press).

Adicionalmente, para el caso de la digestión anaerobia del rango rango psicrófilico (10°C y 20 °C), se llevaron a cabo ensayos con inóculo aclimatado de acuerdo con el protocolo determinado por (Zhu & Ja., 2013). La temperatura del inóculo (30 °C) se redujo a (10 °C) siguiendo diferentes etapas para que las bacterias y archaeas mesófilas puedan adaptarse a baja temperatura. Las etapas realizadas se presentan en la tabla 3:

Tabla 3. Protocolo de aclimatación del inóculo

Paso	Temperatura (°C)	Tiempo (días)
I	30	7
II	25	7
III	20	14
IV	10	14

Al inóculo aclimatado se le realizó una caracterización fisicoquímica en términos de pH, AGV, SV, ST y alcalinidad.

1.1.3. Puesta en marcha de los reactores anaerobios

Todos los experimentos se realizaron por triplicado en reactores *batch* de 50 mL (40 mL de volumen de trabajo), durante 51 días. Se estableció una RIS (relación inóculo/sustrato) de 1 gSV inóculo/gSV sustrato, teniendo en cuenta los resultados reportados en la literatura (Zeng et al; 2010; Neves et al., 2009; Eskicioglu & Ghorbani., 2011). A partir de los datos de SV para garantizar una RIS de 1, se adicionaron 17 mL de inóculo y 2,4 mL de GJ.

Con el objetivo de evaluar la producción de metano por actividad endógena del inóculo, se realizó por triplicado un experimento denominado blanco, el cual contenía solo inóculo y la cantidad de sustrato fue reemplazada con agua destilada.

Todos los ensayos se gasearon con nitrógeno durante 2 minutos para garantizar condiciones de anaerobiosis y, posteriormente fueron tapados con corchos de butilo y sellados con agrafes de aluminio. El contenido de los reactores se agitó lentamente una vez al día durante 2-3 min para crear un sustrato homogéneo, distribución de los microorganismos en el digestor y evitar la formación de una costra superficial (Zhu and Jha; 2013).

El volumen de metano de los ensayos fue medido diariamente y se cuantificó por el método de desplazamiento alcalino con una solución 0,1N de NaOH con pH 12 y fenolftaleína como indicador (Angelidaki et al. 2009). El potencial de biometanización (PBM), se expresó en unidades de volumen de metano a condiciones de presión y temperatura estándar por la masa de SV de gallinaza de

jaula adicionada (m^3 metano/ Kg SV de GJ adicionada). Por otra parte, se cuantificó la concentración de ART, AGV'S, DQO, Alcalinidad, SV y ST al inicio y al final del proceso.

1.1.4. Análisis químicos

Los sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) fueron medidos de acuerdo con los protocolos descritos por Standard Methods (APHA, 2005). La demanda química de oxígeno (DQO) fue medida por el método colorimétrico (APA 2005). Los azúcares reductores totales (ART) se determinaron a partir del protocolo descrito en (Miller., 1959). Los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad total (AT) fueron cuantificados por titulación de acuerdo al protocolo propuesto por (Purser et al., 2014). Y por último se determinó el pH por el método Potenciómetro (SM 4500 B).

1.2. MODELAMIENTO Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS CINÉTICOS Ç

Los datos obtenidos en los ensayos de biodegradabilidad anaerobia fueron utilizados para modelar y estimar los parámetros cinéticos de la producción de metano. Se utilizaron 4 modelos: primer orden, modificado de Gompertz, Chen y Hashimoto y Logístico, los cuales fueron comparados para predecir el mejor ajuste de acuerdo a los datos obtenidos.

1.2.1. Modelo de Primer Orden

La Ecuación (1) es una representación exacta de los resultados (PBM) cuando (a) la hidrólisis es el paso limitante de la velocidad, y (b) la producción máxima de

metano en el tiempo infinito (G_0) representa el rendimiento total de los (SV) hidrolizables al comienzo de las pruebas (Parameswaran & Rittmann, 2012).

$$G(t) = G_0 * (1 - e^{(-Kt)}) \quad \mathbf{(1)} \quad \text{(Ecuación de Roediger)}$$

Donde:

$G(t)$ = rendimiento de metano acumulado en el tiempo de digestión t (ml / g SV),

G_0 = potencial de biometanización del sustrato (ml / g SV),

K = Constante de velocidad de producción de metano (constante de velocidad de desintegración de primer orden) (1 / día).

1.2.2. Modelo Logístico y modificado de Gompertz.

Las ecuaciones (2) y (3) se han identificado como buenos modelos empíricos de regresión no lineal y comúnmente usados en la simulación de la acumulación de metano (B. Deepanraj et al., 2015).

$$G(t) = G_0 * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{\max} * e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \mathbf{(2)}$$

$$G(t) = \frac{G_0}{1 + \exp \left[4 * R_{\max} \left(\frac{\lambda - t}{G_0} \right) + 2 \right]} \quad \mathbf{(3)}$$

Donde:

$G(t)$ = El rendimiento de metano acumulado en el tiempo de digestión (m^3 metano/ Kg SV adicionado)

G_0 = potencial de biometanización del sustrato (m^3 metano/ Kg SV adicionado)

R_{\max} = velocidad máxima de producción de metano (ml / g SV.d),

λ = fase de latencia (días); t = tiempo (días) ; $e = 2.7183$

1.2.3. Modelo de Chen y Hashimoto

El modelo de Chen y Hashimoto descrito por (Kafle et al., 2015) se representa en la ecuación (4):

$$G(t) = G_0 \left(1 - \frac{K_{CH}}{HRT * \mu_m + K_{CH} - 1} \right) \quad (4)$$

Donde:

G (t) = El rendimiento de metano acumulado en el tiempo de digestión (m³ metano/ Kg SV adicionado)

Go = potencial de biometanización del sustrato (m³ metano/ Kg SV adicionado)

HRT = tiempo de digestión o tiempo de retención hidráulico (días),

K_{CH} = constante cinética de Chen y Hashimoto (adimensional),

μ_m = velocidad máxima de crecimiento específico de los microorganismos (1 / día),

El tiempo de retención crítico (TRH Crítico) se determina utilizando la ecuación (5).

$$TRH_{critico} = \frac{1}{\mu_m} \quad (5)$$

Los parámetros cinéticos se estiman mediante una regresión no lineal en el programa IBM SPSS statistics 19 (2010), usando el algoritmo Levenberg–Marquardt (LMA), también conocido como método de mínimos cuadrados amortiguados (DLA). Las diferencias significativas en los rendimientos acumulados de metano experimentales se determinan mediante el uso de un solo factor Anova (Análisis de Varianza) empleando el software Minitab 15 (2007) y la prueba LSD se calcula con unos intervalos de confianza individuales de Fisher del 95%.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS

2.1. ENSAYOS DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA

2.1.1. Adaptación del inóculo a régimen psicrófilico

En la tabla 4, se presenta una comparación en términos fisicoquímicos del inóculo mesofílico con el inóculo adaptado a psicrofilia.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del sustrato, inóculo e inóculo adaptado

Parámetro	UNIDADES	Inóculo mesofílico	Inóculo adaptado a psicrofilia
pH	-----	7,6	7,5
Sólidos Totales (ST)	g/Kg	31,5	30
Sólidos Volátiles (SV)	g/Kg	19	15
AT	mg/l	6500	6949
AGV	mg/l	1250	1359
Densidad	g/ml	1,04	1,04

Los resultados obtenidos muestran que el pH del consorcio microbiano no se ve afectado por el proceso de aclimatación del inóculo. La concentración de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) disminuyó 5% y 21% respectivamente. Por el contrario, la alcalinidad total (AT) aumento en 7% y la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) en 9%. Estos resultados indican que durante el periodo de adaptación ocurre hidrólisis orgánica del material particulado presente en el inóculo, incrementando la concentración de materia orgánica soluble fácilmente degradable como los ácidos. Esta situación es favorable para el proceso de digestión porque el consorcio microbiano aprovechará de mejor forma el sustrato (gallinaza) suministrado como fuente de carbono, dado que la concentración de materia orgánica residual contenida en el inóculo es muy baja para ser utilizada como fuente de energía. (Palatsi et al., 2009).

2.1.2. Análisis del rendimiento acumulado y la velocidad de producción de metano

La figura 2 muestra el rendimiento acumulado de metano ($\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{Kg SV}$ adicionado) y la velocidad de producción de metano ($\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{Kg SV} \cdot \text{día}$) a las temperaturas de 10°C (a), 20°C (b), 25°C (c), 30°C (d), 35°C (e), 37°C (f) y 39°C (g) con el inóculo mesófilo e inóculo adaptado para el caso particular de las temperaturas (10°C (a) y 20°C (b)).

2.1.2.1. Producción de metano en rango psicrófilico: 10°C y 20°C

El arranque de los biorreactores a las temperaturas psicrófilicas evaluadas presenta fase de latencia con una duración de 9 días a 10°C y 1.5 días a 20°C (Figura 2a y 2b). En el mismo sentido se aprecia que los experimentos con inóculo adaptado no reducen la fase de latencia. El comportamiento observado se debe a que la velocidad de hidrólisis es más lenta en el rango psicrófilico que en el mesófilico, porque hay menor solubilidad de los compuestos gaseosos, aumento de la viscosidad de los líquidos y se presenta un efecto cinético negativo sobre las reacciones químicas y biológicas (Lettinga *et al.*, 2001).

Con respecto a los rendimientos de la producción de metano operando a 10°C , el ensayo realizado con inóculo adaptado alcanzó un rendimiento de $0,63 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ adicionado, 30% más alto que el obtenido para el experimento con inóculo mesófilo. Comportamiento similar se observa a la temperatura de 20°C donde los rendimientos fueron de $0,82 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ adicionado y $0,71 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$ adicionado para el inóculo aclimatado e inóculo mesófilo, respectivamente. La diferencia de los rendimientos puede ser explicada desde el punto de vista microbiológico; en el cual el inóculo adaptado es capaz de favorecer el desarrollo poblaciones de arqueas metanogénas psicrotolerantes, lo cual hace que la

actividad enzimática no se afecte a bajas temperaturas (Albers *et al.*, 2001; Konings *et al.*, 2002).

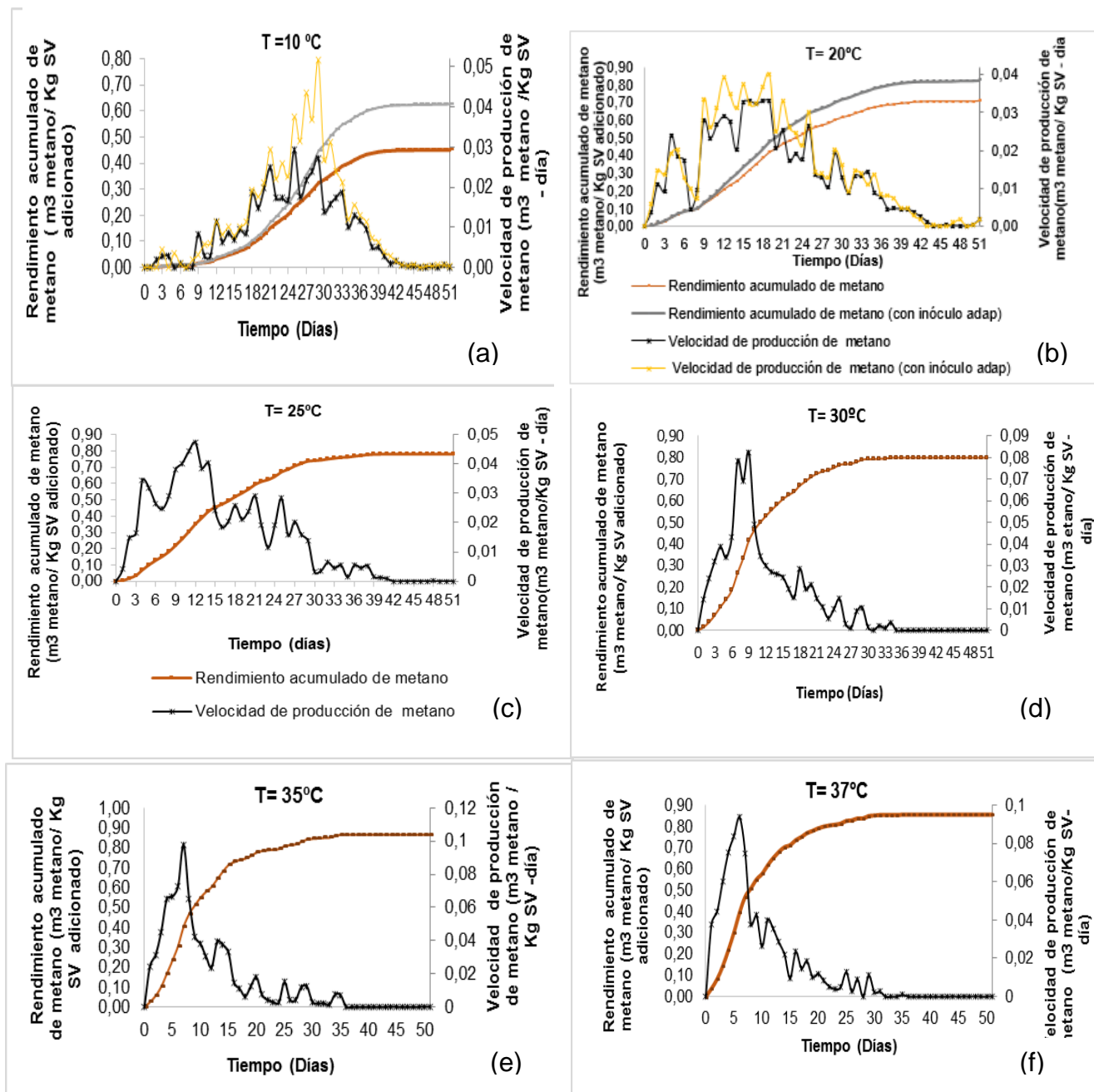
Desde el punto de vista bioquímico, los estudios realizados previamente afirman que la ruta metabólica para la producción de metano en régimen psicrófilo es la metanogénesis acetoclástica (Nozhevnikova *et al.*, 2007). De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que el estiércol bovino empleado en este estudio es un inóculo apropiado para la degradación anaerobia a bajas temperaturas, dado que presenta un recuento mayor de arqueas metanogénicas acetoclásticas de $2,8 \times 10^4$ NMP células/g ssv comparado con las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas (Alzate & Quintero, *In press*) como se describió en la sección de metodología. Teniendo en cuenta lo discutido anteriormente, se demostró que es posible producir metano a partir de gallinaza de jaula a las temperaturas evaluadas en régimen psicrófilo. Una de las ventajas de llevar a cabo la digestión anaerobia de la gallinaza de jaula a bajas temperaturas es que la concentración de los iones amonio (generados por la degradación anaerobia de las proteínas), es baja evitando inhibición del proceso.

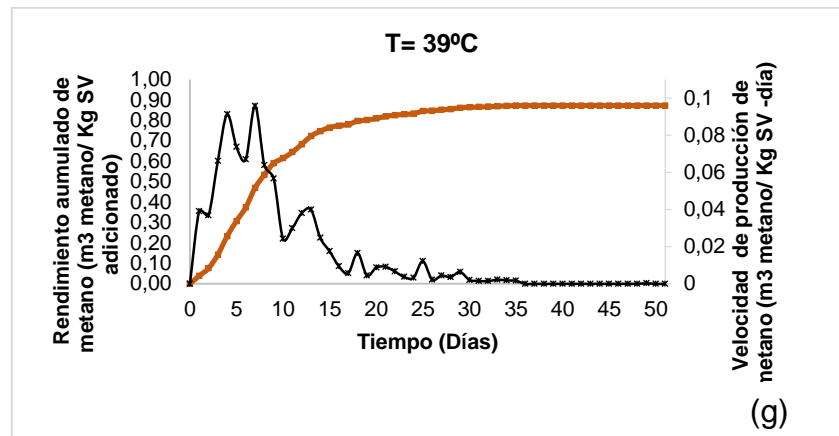
2.1.2.2. Producción de metano en rango mesófilo: 25°C, 30°C, 35 °C, 37°C y 39°C

Los máximos rendimientos de metano para las temperaturas de 25°C, 30 °C, 35 °C, 37°C y 39°C fueron 0,78, 0,80, 0,86, 0,86 y 0,87 ($\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{Kg SV}$ adicionado), (figura 2c, d, e, f y g), respectivamente. Estos resultados indican que la temperatura es directamente proporcional al rendimiento de metano. En términos generales, los estudios indican que la digestión anaerobia de diferentes biomásas (lignocelulósicos, estiércoles, sólidos urbanos y aguas residuales) presenta un mejor rendimiento a temperaturas entre 35°C y 39°C en el rango mesófilo (Mao *et al.*, 2015).

Con respecto a las variables de respuesta de la DA de la GJ, los mayores porcentajes de reducción en términos de SV, ST, DQO y ART fueron 54,29% (39 °C), 52,39% (39°C), 71,03% (37°C) y 58,18% (39 °C) respectivamente para el rango de temperatura mesofílico y los mayores porcentajes de reducción en términos de SV, ST, DQO y ART fueron 26,422 %,23,55%, 35,80% y 41,991%, respectivamente a 20 °C (utilizando el inóculo adaptado) para el rango de temperatura psicofílico Esta información se presenta en (ANEXOS F, G, H, I).

Figura 2. Rendimiento acumulado de metano y velocidad de producción de metano para la DA de GJ a diferentes temperaturas.





2.2 ANÁLISIS CINÉTICO

Las Tablas 5, 6, 7 y 8 resumen los parámetros obtenidos de los modelos cinéticos: de primer orden, modificado de Gompertz, Logístico y Chen y Hashimoto, respectivamente, estimados a partir de los datos experimentales de los potenciales de biometanización de la gallinaza de jaula a diferentes temperaturas. Los resultados indican que el modelo con mejor ajuste fue el modelo modificado de Gompertz, específicamente para los ensayos que operaron a las temperaturas de 25°C, 35°C, 37°C y 39°C (empleando inóculo mesófilo). (Kafle and King., 2012) reportaron que el modelo modificado de Gompertz era más adecuado para los resultados experimentales de la digestión anaerobia de estiércol de cerdo a temperaturas mesofílicas.

El modelo Logístico representa el mejor modelo de ajuste para los rendimientos de metano de la DA de GJ a 10°C, 10°C (utilizando inóculo adaptado), 20 °C, , 20°C (utilizando inóculo adaptado) y 30°C; así mismo este modelo predice adecuadamente la fase de latencia con respecto al valor experimental observado en la figura 2a para 10 °C y 10 °C (utilizando inóculo adaptado). (Deepanraj et al., 2015) estudiaron el efecto de la temperatura (30°C – 60°C) en la DA de residuos de alimentos y encontraron que el modelo Logístico se ajusta adecuadamente al estudio cinético.

De acuerdo a la tabla 8, los resultados para el HRT (tiempo mínimo de retención hidráulico) obtenidos con el modelo de Chen y Hashimoto, se recomienda un (HRT crítico) de aproximadamente 2 días para evitar el lavado de la biomasa en la DA de GJ en condiciones mesófilas y en condiciones psicrófilas un tiempo de aproximadamente 14 días. La constante de Chen y Hashimoto (K_{ch}) es un parámetro adimensional que indica el rendimiento cinético de la digestión anaerobia, un aumento de K_{ch} indica la inhibición de la fermentación, mientras que una disminución indica una alta velocidad de degradación del sustrato. Según los datos observados en la tabla 8 a medida que la temperatura aumentó lo hizo también el valor de K_{ch} ; este aumento probablemente se debió a que en las temperaturas mesófilas, los biorreactores fueron operados hasta 51 días, siendo el tiempo adecuado de operación de aproximadamente 30 días para este rango de temperatura, pero estos valores no se pueden comparar con estudios anteriores ya que depende de los métodos experimentales, procedimientos y sustrato usado. Según los estudios realizados por (Hashimoto., 1982) este parámetro no es función de la temperatura si no de la concentración de sustrato, pero si puede verse afectado por sustancias inhibitorias.

Por otra parte, se observa en la figura 3 (a, b, c y d) que para los digestiones llevadas a cabo a las temperaturas de 10 °C, 10 °C (utilizando inóculo adaptado), 20°C y 20 °C (utilizando inóculo adaptado), no se tuvo en cuenta la fase de latencia en la regresión no lineal de los modelos de Primer Orden y Chen y Hashimoto, dado que la forma sigmoideal del perfil de rendimiento acumulado de metano no se puede ajustar a estos modelos cinéticos. Finalmente en la figura 3 (a, b, c, d, e, f, g, h, y i) se observa el rendimiento de metano predicho por cada modelo y el experimental para cada temperatura.

Tabla 5. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo cinético de primer orden

Parámetro	Unidades	T= 10 °C	T= 10 °C ADAP	T=20 °C	T=20 °C ADAP	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=37 °C	T=39 °C
Modelo Cinético de Primer Orden										
Constante de velocidad de desintegración de (K)	[1/d]	0,02	0,026	0,034	0,043	0,043	0,076	0,09	0,106	0,11
Potencial de producción de metano del sustrato (G ₀)	m ³ /Kg SV añadidos	0,662	0,774	0,889	0,901	0,948	0,855	0,896	0,878	0,893
Rendimiento acumulado de metano - (experimental -51 días)	m ³ /Kg SV añadidos	0,4509	0,6256	0,7054	0,8231	0,7808	0,8	0,8662	0,8563	0,8728
Rendimiento acumulado de metano -(predicho - 51 días)	m ³ /Kg SV añadidos	0,4233	0,5685	0,732	0,8005	0,8422	0,8373	0,8869	0,8741	0,8897
Diferencia entre el rendimiento de metano acumulado predicho y experimental	(%)	6,12	9,13	3,78	2,75	7,86	4,66	2,39	2,08	1,94
Factor de correlación R ²		0,776	0,727	0,951	0,92	0,966	0,963	0,978	0,984	0,978
RMSE		0,0745	0,1246	0,0543	0,0793	0,0472	0,0458	0,0351	0,0275	0,0328

Tabla 6. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo modificado de Gompertz

Parámetro	Unidades	T=10 °C	T= 10 °C ADAP	T=20 °C	T=20 °C ADAP	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=37 °C	T=39 °C
Modelo Modificado de Gompertz										
Fase de Latencia (λ)	[días]	14,094	15,9	5,036	5,311	3,062	2,069	0,99	0,376	0,795
Velocidad máxima de Producción de metano (R _{máx})	m ³ /Kg Sv día	0,022	0,035	0,03	0,035	0,037	0,054	0,06	0,064	0,071
Potencial de producción de metano del sustrato (G ₀)	m ³ /Kg SV añadidos	0,48	0,66	0,729	0,848	0,794	0,798	0,854	0,85	0,864
Rendimiento acumulado de metano - (experimental -51 días)	m ³ /Kg SV añadidos	0,4509	0,6256	0,7054	0,8005	0,8422	0,8373	0,8869	0,8741	0,8897
Rendimiento acumulado de metano - (predicho - 51 días)	m ³ /Kg SV añadidos	0,4670	0,6487	0,7175	0,8344	0,7890	0,7890	0,8538	0,8499	0,8640
Diferencia entre el rendimiento de metano acumulado predicho y experimental	(%)	3,58	3,69	1,72	4,24	6,31	5,76	3,73	2,76	2,90
Factor de correlación R ²		0,999	0,999	0,997	0,997	0,998	0,997	0,982	0,993	0,987
RMSE		0,011	0,0199	0,0081	0,008	0,0108	0,1008	0,0194	0,0173	0,0146

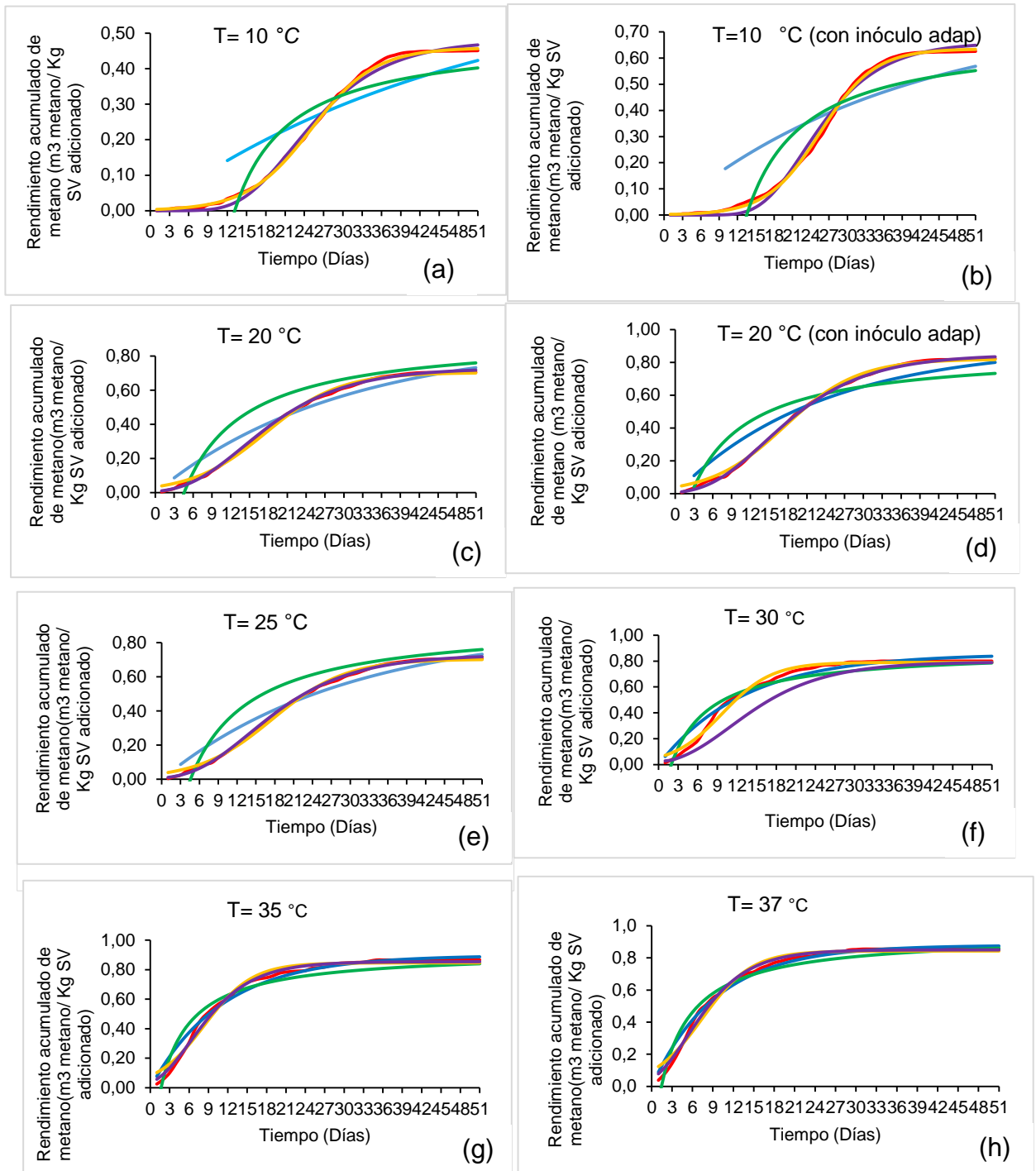
Tabla 7. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo Logístico

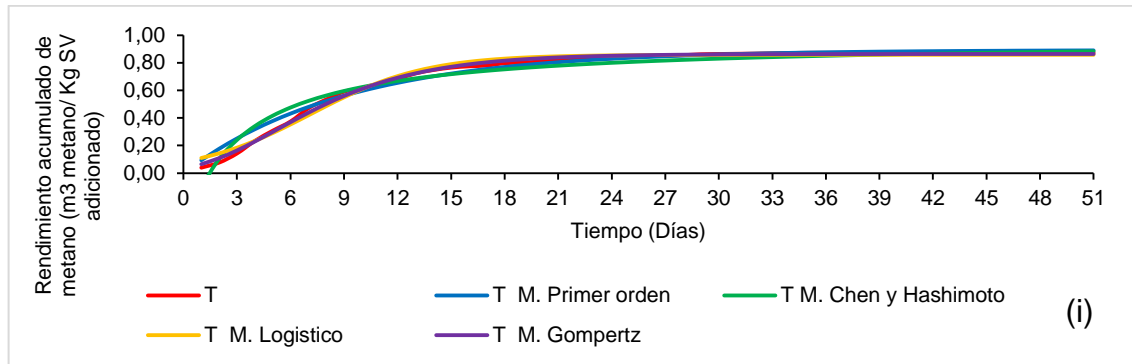
Parámetro	Unidades	T=10 °C	T= 10 °C ADAP	T=20 °C	T=20 °C ADAP	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=37 °C	T=39 °C
Modelo Logístico										
Fase de Latencia (λ)	[días]	15,08	16,776	5,888	5,723	3,462	2,152	0,95	0,152	0,75
Velocidad máxima de Producción de metano (Rmáx)	m3/Kg SV día	0,023	0,036	0,03	0,035	0,037	0,052	0,057	0,058	0,067
Potencial de producción de metano del sustrato (G0)	m3/Kg SV añadidos	0,459	0,635	0,703	0,82	0,777	0,79	0,846	0,843	0,858
Rendimiento acumulado de metano - (experimental -51 días)	m3/Kg SV añadidos	0,4509	0,6256	0,7054	0,8005	0,8422	0,8373	0,8869	0,8741	0,8897
Rendimiento acumulado de metano -(predicho - 51 días)		0,4565	0,6330	0,7007	0,8173	0,7763	0,7900	0,8460	0,8430	0,8580
Diferencia entre el rendimiento de metano acumulado predicho y experimental	(%)	1,24	1,18	0,67	2,11	7,82	5,65	4,61	3,55	3,57
Factor de correlación R ²		0,996	0,991	0,999	0,999	0,998	0,997	0,994	0,994	0,996
RMSE		0,0051952	0,007955	0,013066694	0,014717	0,020968	0,025326	0,031201	0,028452	0,025622

Tabla 8. Resultados de la regresión y análisis cinético para el modelo de Chen y Hashimoto

Parámetro	Unidades	T=10 °C	T= 10 °C ADAP	T=20 °C	T=20 °C ADAP	T=25 °C	T=30 °C	T=35 °C	T=37 °C	T=39 °C
Modelo Chen y Hashimoto										
Constante cinética de Chen y Hashimoto KCH		0,663	0,693	2,119	3,563	2,987	3,171	2,969	3,341	3,284
velocidad de crecimiento específica máxima (μ m)	[1/día]	0,076	0,074	0,218	0,388	0,523	0,516	0,608	0,7	0,696
Potencial de producción de metano del sustrato (G0)	m3/Kg SV añadidos	0,495	0,69	0,919	0,872	0,864	0,884	0,923	0,943	0,967
Rendimiento acumulado de metano - (experimental -51 días)	m3/Kg SV añadidos	0,4509	0,6256	0,7054	0,8005	0,8422	0,8373	0,8869	0,8741	0,8897
Rendimiento acumulado de metano -(predicho - 51 días)	m3/Kg SV añadidos	0,4023	0,5521	0,7599	0,7330	0,7740	0,7856	0,8399	0,8602	0,8829
Diferencia entre el rendimiento de metano acumulado predicho y experimental	(%)	10,79	11,75	7,72	8,43	8,11	6,17	5,30	1,59	0,76
HRT Crítico		0,09	0,09	0,13	0,12	0,12	0,16	0,19	0,63	1,31
Factor de correlación R ²		0,836	0,814	0,86	0,881	0,904	0,925	0,936	0,962	0,96
RMSE		0,06227168	0,096682	0,105792829	0,118961	0,115048	0,064721	0,059507	0,042237	0,044202

Figura 3. Rendimiento de metano acumulado predicho y experimental a diferentes temperaturas





2.2.1. Predicción de la velocidad de la biodegradabilidad de la gallinaza de jaula (GJ)

La reducción de los sólidos volátiles durante el tiempo de digestión es una medida de la biodegradabilidad anaerobia del sustrato empleado. (Friedrich & Takacs 2013; Syaichurrozi et al., 2013) predijeron biodegradabilidad de la vinaza para la producción de metano a través de modelo modificado de Gompertz a través la ecuación (6) y a partir de la teoría matemática de la biodegradabilidad expuesta por (Linke., 2006; Syaichurrozi et al., 2013), en este estudio se aplicó para la predicción de la biodegradabilidad a través del modelo Logístico obteniéndose la ecuación (7):

$$C(t) = \left(C_0 - \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{\text{máx}} * e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} * C_0 \right) + C_e \quad (6)$$

$$C(t) = \left[C_0 - \frac{C_0}{1 + \text{EXP} \left[4 * R_{\text{max}} \left(\frac{\lambda - t}{G_0} \right) + 2 \right]} \right] + C_e \quad (7)$$

Donde:

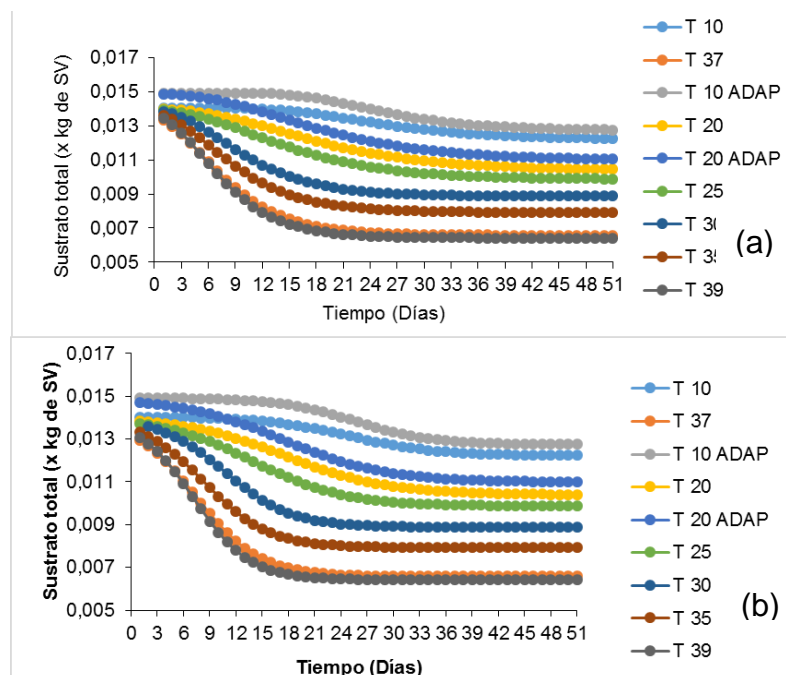
C(t) es la cantidad de SV en el tiempo de digestión (kg); Co es el total de SV que pueden ser removidos (Kg); (Co = Ci–Ce, Ci es la cantidad SV en la carga (kg) y Ce es la cantidad los SV en el efluente (kg)).

De acuerdo a lo anterior, las ecuaciones 6 y 7 fueron utilizadas para predecir la biodegradabilidad anaerobia de la gallinaza de jaula a las temperaturas evaluadas.

Las curvas del modelo cinético de la biodegradabilidad de la GJ se muestran en la figura 4(a y b) para el modelo modificado de Gompertz y Logístico, respectivamente. Se puede observar que el comportamiento de la digestión anaerobia para todas las temperaturas es el mismo. Particularmente para las temperaturas de 37°C y 39 °C los valores de C_e son 0,006 y 0,006 (Kg SV) respectivamente, lo cual indica que la biodegradabilidad de SV en la DA de GJ a estas temperaturas es la misma. Además se evidencia que las fases de rápida degradación duraron aproximadamente 19 días para el proceso realizado a las temperaturas de 30 °C, 35 °C, 37 °C y 39 °C. En cuanto al régimen psicrófilo; las digestiones a 20 °C, 20 °C (usando inóculo adaptado) y 25°C fue de aproximadamente 27 días, mientras que, para los operados a 10°C y 10°C (usando inóculo adaptado) empezó aproximadamente en el día 16 y terminó en el día 31. Después de esta fase de rápida degradación, el proceso anaerobio entro en una fase de estabilización (se presenta agotamiento de nutrientes Momoh & Saroj., 2016) hasta el día 51, donde la producción de metano es nula.

Figura 4. Biodegradabilidad de la GJ a diferentes temperaturas.

(a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico



2.2.2 Modelos empíricos para la predicción de la velocidad máxima de crecimiento específico de los microorganismos (μ_m), fase de latencia (λ) y la Velocidad máxima de Producción de metano ($R_{m\acute{a}x}$) en función de la temperatura

Los valores $\mu_{m\acute{a}x}$ calculados con el modelo cinético de Chen y Hashimoto se presentan en la tabla 8. Según los resultados obtenidos en este estudio, los valores de $\mu_{m\acute{a}x}$ se ajustaron a una regresión lineal como originalmente fue propuesta la ecuación empírica para $\mu_{m\acute{a}x}(T)$ por (Hashimoto et al., 1981) y (Chen y Hashimoto., 1982). Los valores de los parámetros cinéticos de este estudio fueron superiores a los reportados por (C.H. Pham et al., 2014) quienes estudiaron la cinética de la DA de estiércol de cerdo mediante el modelo de Chen y Hashimoto obteniendo valores de $\mu_{m\acute{a}x}$ de 0.0170, 0.0185, 0.0365, 0.0602 y 0.1836 (días⁻¹) a 10 °C, 15°C, 20°C, 25°C y 30°C, respectivamente.

Adicionalmente en esta investigación, se proponen 2 modelos empíricos para λ y $R_{m\acute{a}x}$. En la tabla 9 y en la figura 5, figura 6 (a,b) y figura 7 (a,b) se muestran los resultados obtenidos del ajuste de los parámetros cinéticos (λ y $R_{m\acute{a}x}$) obtenidos del modelo Logístico y modificado de Gompertz. Los parámetros λ y $R_{m\acute{a}x}$ fueron obtenidos mediante una regresión no lineal, y el parámetro $\mu_{m\acute{a}x}$ se determinó con una regresión lineal en el programa IBM SPSS statistics 19 (2010). Los resultados indican que el modelo empírico de λ (T) con base al modelo modificado de Gompertz posee el mayor R^2 (0,998), de igual manera lo es el modelo empírico de $R_{m\acute{a}x}$ (T) con un R^2 (0,980).

Figura 5. Modelo empírico para la predicción de $\mu_{\text{máx.}}$ (1/día) de acuerdo al modelo de Chen y Hashimoto

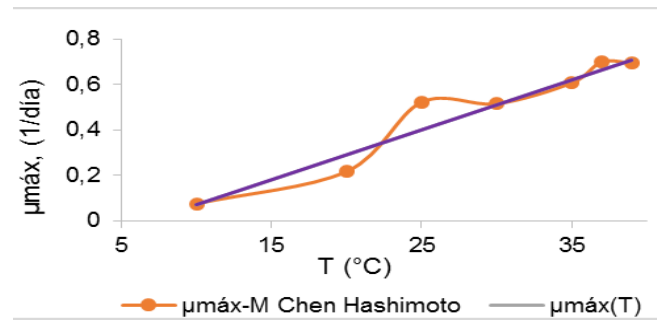


Figura 6. Modelo empírico para la predicción de λ (días): (a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico

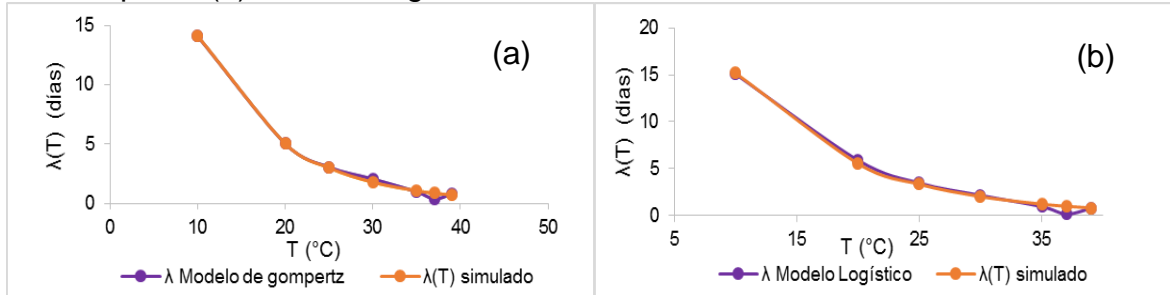


Figura 7. Modelo empírico para la predicción $R_{\text{máx.}}$ ($\text{m}^3/\text{Kg SV día}$): (a) Modelo modificado de Gompertz, (b) Modelo Logístico

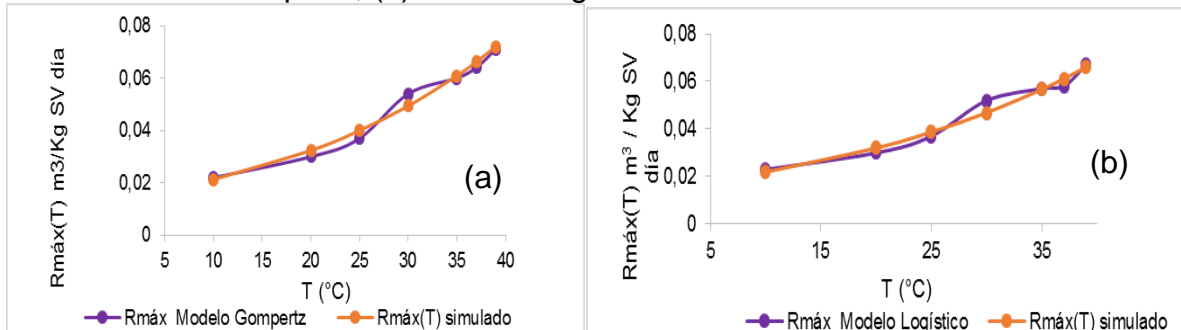


Tabla 9. Modelos empíricos para la predicción de $\mu_{\text{máx}}$, λ y $R_{\text{máx}}$ en función de la temperatura

Parámetro	Rango de temperatura	Expresión del modelo	R ²
$\mu_{\text{máx}}$	10-39 °C	$\mu_{\text{máx}}(T) = 0,022 * T - 0,149$	0,939
λ (M. m. Gompertz)	10-39 °C	$\lambda(T) = 39,527 * \text{EXP}(-0,103 * T)$	0,998
λ (M. Logístico)	10-39 °C	$\lambda(T) = 41,687 * \text{EXP}(-0,101 * T)$	0,994
$R_{\text{máx}}$ (M. m. Gompertz)	10-39 °C	$R_{\text{máx}}(T) = 0,014 * \text{EXP}(0,042 * T)$	0,98
$R_{\text{máx}}$ (M. Logístico)	10-39 °C	$R_{\text{máx}}(T) = 0,015 * \text{EXP}(0,038 * T)$	0,972

2.2.3. Análisis Método de diferencia significativa mínima (LSD) de Fisher

Tabla 10. Diferencias Significativas entre rendimientos acumulados de metano a diferentes temperaturas

Diferencias significativas		Rendimiento acumulado de metano								
		T 10 °C	T 10 °C (con inóculo adaptado)	T 20 °C	T 20 °C (con inóculo adaptado)	T 25 °C	T 30 °C	T 35 °C	T 37 °C	T 39 °C
Rendimiento acumulado de metano	Biorreactores	T 10 °C	T 10 °C (con inóculo adaptado)	T 20 °C	T 20 °C (con inóculo adaptado)	T 25 °C	T 30 °C	T 35 °C	T 37 °C	T 39 °C
	T 10 °C	-	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	T 10 °C (con inóculo adaptado)	NO	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	T 20 °C	SI	SI	-	NO	SI	SI	SI	SI	SI
	T 20 °C (con inóculo adaptado)	SI	SI	NO	-	NO	SI	SI	SI	SI
	T 25 °C	SI	SI	SI	NO	-	NO	SI	SI	SI
	T 30 °C	SI	SI	SI	SI	NO	-	NO	NO	SI
	T 35 °C	SI	SI	SI	SI	NO	NO	-	NO	NO
	T 37 °C	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	-	NO
	T 39 °C	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	-

Según los datos experimentales del rendimiento de metano y teniendo en cuenta las diferencias significativas entre la temperatura de operación para cada reactor, se puede evidenciar que si no existen diferencias significativas entre dos o más biodigestores operados a distinta temperaturas, se puede concluir que el

rendimiento de metano será similar para un biodigestor operado en distintas regiones de Colombia a estas temperaturas,; esto sucede para los biodigestores entre (30 °C y 37 °C); 20 °C con respecto a 20 °C (utilizando inóculo adaptado)y 25 °C; 10 °C con respecto a 10 °C (utilizando inóculo adaptado); 25 °C con respecto a 20 °C (utilizando inóculo adaptado),37 °C y 39 °C.

3. CONCLUSIONES

- El mayor rendimiento acumulado de metano en el rango psicrófilico 0,82 CH₄/ Kg SV adicionado se alcanzó cuando la digestión anaerobia de la gallinaza de jaula se llevó a cabo a 20 °C, empleando inóculo adaptado. Con respecto al rango mesofílico, el mayor rendimiento fue de 0,87 m³ CH₄/ Kg SV adicionado a 39 °C. En régimen psicrófilico se requiere 47% más de tiempo de digestión anaerobia comparado con el proceso realizado en la mesofilia.
-
- De acuerdo a los resultados del estudio cinético, el modelo modificado de Gompertz se ajusta adecuadamente a los datos del rendimiento acumulado de metano experimental en el rango de temperatura mesófilo, no obstante el modelo Logístico es el modelo que genera un mejor ajuste en el rango de temperatura psicrófilo. Adicionalmente los modelos empíricos propuestos para R_{máx} y λ en base al modelo modificado de Gompertz, y μ_{máx} en base al modelo de Chen y Hashimoto pueden significar una herramienta importante para el diseño y construcción de biodigestores en cualquier región bioclimática de Colombia.
- Los modelos cinéticos de biodegradabilidad en base a los modelos: modificado de Gompertz y Logístico presentan el mejor ajuste para el rango de temperaturas mesofílico y psicrófilico, respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

ABOUELENIEN, F., NAMBA, Y., KOSSEVA, M. R., NISHIO, N., & NAKASHIMADA, Y. (2014). Enhancement of methane production from co-digestion of chicken manure with agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 159, 80-87.

ALBERS,S.V., VAN DE VOSSENBERG,J.L.C.M., DRIESSEN,A.J.M. AND KONINGS,W.N. (2001) Bioenergetics and solute uptake under extreme conditions. *Extremophiles*, 5 (5), 285- 294.

ALZATE MONCADA, M., & QUINTERO SILVA, M. (In press). Caracterización de grupos tróficos durante un proceso de digestión anaerobia con lodo estiércol bovino usando un método de bajo costo. *Revista Ion*.

ANDERSON, K., SALLIS, P., UYANIK, S. (2003). Anaerobic treatment processes. En: *The handbook of water and wastewater microbiology*. pp. 391-426. Editores: Mara, D.; Horan, N. Academic Press. Londres. ISBN 0-12-470100-0.

ANGENENT L. T., SUNG S., RASKIN L. (2002). Methanogenic population dynamics during startup of a full-scale anaerobic sequencing batch reactor treating swine waste. *Water Research* 36, 4648-4654.

APHA, AWWA & WEF.(2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association. Washington, D.C: American Public Health Association

APPELS, L., LAUWERS, J., DEGRÈVE, J., HELSEN, L., LIEVENS, B., WILLEMS, K., .. & DEWIL, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295-4301.

BERNER, W., BUCHER, P., OESCHGER, H., STAUFFER, B., (1975). Analysis and interpretation of gas content and composition in natural ice. AISH/AIMPA Symposium, Isotopes and Impurities in Snow and Ice, Grenoble

Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y DNP (2009), Plan Decenal Ambiental 2019, borrador en revisión desarrollado por la facultad de Administración de la Universidad de los Andes.

DEEPANRAJ, B., SIVASUBRAMANIAN, V., & JAYARAJ, S. (2015). Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 121, 100-104.

DENG, L., YANG, H., LIU, G., ZHENG, D., CHEN, Z., LIU, Y., ... & LEI, Y (2014). Kinetics of temperature effects and its significance to the heating strategy for anaerobic digestion of swine wastewater. *Applied Energy*, 134, 349-355.

DÍAZ, J. P., REYES, I. P., LUNDIN, M., & HORVÁTH, I. S. (2011). Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: kinetic evaluation and synergetic effects. *Bioresource technology*, 102(23), 10834-10840.

EL-MASHAD, H. M., ZEEMAN, G., VAN LOON, W. K., BOT, G. P., & LETTINGA, G. (2004). Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource technology*, 95(2), 191-201.

ESCALANTE, H., ORDUZ, J. & ZAPATA, L. (2010). Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Unidad de planeación minero energética, Universidad Industrial de Santander, UIS.

ESKICIOGLU, C., & GHORBANI, M. (2011). Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. *Process Biochemistry*, 46(8), 1682-1687

ESTRADA PAREJA, M. M (2005) Manejo y Procesamiento de la gallinaza. *Revista La sallista de Investigación*, Vol 2, 43-48.

FONGSATITKUL, P., ELEFSINIOTIS, P., & WAREHAM, D. G. (2012). Two-phase anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: estimation of methane production. *Waste Management & Research*, 30(7), 720-726.

FRIEDRICH, M., & TAKÁCS, I. (2013). A new interpretation of endogenous respiration profiles for the evaluation of the endogenous decay rate of heterotrophic biomass in activated sludge. *Water Research*, 47(15), 5639-5646.

GAVALA, H. N., ANGELIDAKI, I., & AHRING, B. K. (2003). Kinetics and modeling of anaerobic digestion process. In *Biomethanation I* (pp. 57-93). Springer Berlin Heidelberg

GERDAY, C., AITTALEB, M., BENTAHIR, M., CHESSA, J. P., CLAVERIE, P., COLLINS, T., ... & HOYOUX, A. (2000). Cold-adapted enzymes: from fundamentals to biotechnology. *Trends in biotechnology*, 18(3), 103-107.

GHATAK, M. D., & MAHANTA, P. (2014). Effect of Temperature on Anaerobic Co-digestion of Cattle dung with Lignocellulosic Biomass. *J. Adv. Eng. Res*, 1, 1-7.

GIBSON, A. M., BRATCHELL, N., & ROBERTS, T. A. (1987). The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. *Journal of Applied Bacteriology*, 62(6), 479-490.

HASHIMOTO, A. G., VAREL, V. H., & CHEN, Y. R. (1981). Ultimate methane yield from beef cattle manure: effect of temperature, ration constituents, antibiotics and manure age. *Agricultural Wastes*, 3(4), 241-256.

HASHIMOTO, A. G. (1982). Methane from cattle waste: effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter (K). *Biotechnology and bioengineering*, 24(9), 2039-2052.

HUANG, G., WANG, X., & HAN, L. (2011). Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties. *Bioresource technology*, 102(2), 1455-1461.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2011). *Clasificaciones climáticas Colombia*. Bogotá, D.C IDEAM

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 a). *Anuario climatológico*. Bogotá, D.C : IDEAM

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 b). *Sistema de Información Ambiental SIA Gestión de Metadatos Institucional*. Bogotá, D.C : IDEAM

JAIN, S., JAIN, S., WOLF, I. T., LEE, J., & TONG, Y. W. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for

anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 142-154.

KAFLE, G. K., & CHEN, L. (2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management*, 48, 492-502.

KAFLE, G. K., & KIM, S. H. (2012). Kinetic study of the anaerobic digestion of swine manure at mesophilic temperature: a lab scale batch operation. *Journal of Biosystems Engineering*, 37(4), 233-244.

KAVITHA, S., BRINDHA, G. J., GLORIANA, A. S., RAJASHANKAR, K., YEOM, I. T., & BANU, J. R. (2016). Enhancement of aerobic biodegradability potential of municipal waste activated sludge by ultrasonic aided bacterial disintegration. *Bioresource technology*, 200, 161-169.

KHANAL, S.K (2008) *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and Applications*. Editorial Blackwell Publishing, Estados Unidos, 29-63.

KONINGS, W. N., ALBERS, S. V., KONING, S., & DRIESSEN, A. J. (2002). The cell membrane plays a crucial role in survival of bacteria and archaea in extreme environments. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 81(1-4), 61-72.

KOTSYURBENKO, O. R. (2005). Trophic interactions in the methanogenic microbial community of low-temperature terrestrial ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology*, 53(1), 3-13.

LAY, J. J., LI, Y. Y., & NOIKE, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*, 31(6), 1518-1524.

LETTINGA,G., REBAC,S. AND ZEEMAN,G. (2001). Challenge of psychrophilic anaerobic waste water treatment. Trends in Biotechnology, 19 (9), 363-370.

LINKE, B. (2006). Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing. Biomass and bioenergy, 30(10), 892-896.

LI, Y., ZHANG, R., HE, Y., ZHANG, C., LIU, X., CHEN, C., & LIU, G. (2014). Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). Bioresource technology, 156, 342-347.

LI, Y., ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C., HE, Y., & LIU, X. (2013). Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. Bioresource technology, 149, 565-569.

LOKSHINA, L. Y., & VAVILIN, V. A. (1999). Kinetic analysis of the key stages of low temperature methanogenesis. Ecological Modelling, 117(2), 285-303.

LO, H. M., KURNIAWAN, T. A., SILLANPÄÄ, M. E. T., PAI, T. Y., CHIANG, C. F., CHAO, K. P., ... & LIN, K. C. (2010). Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. Bioresource Technology, 101(16), 6329-6335.

MADIGAN, M., MARTINKO, J., PARKER, J. (2004). Brock Biología de los Microorganismos, 10ª edición. Prentice-Hall, Madrid. 152, 448-451, 645-648, 930-931.

MADIGAN, M. T., MARTINKO, J. M., PARKER, J., & BROCK, T. D. (2006). Biología de los microorganismos. Pearson Prentice Hall., 10, p. 151-168

MAHMOUD, N., ZEEMAN, G., GIJZEN, H., & LETTINGA, G. (2004). Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digester system. *Water Research*, 38(9), 2348-2358.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., & REN, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.

MA, J., YU, L., FREAR, C., ZHAO, Q., LI, X., & CHEN, S. (2013). Kinetics of psychrophilic anaerobic sequencing batch reactor treating flushed dairy manure. *Bioresource Technology*, 131, 6-12.

MARIN-BATISTA, J., CASTRO, L., & ESCALANTE, H. (2015). Effect of chicken manure organic load on biomethane potential. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 18-23.

MARTÍ-HERRERO, J., CHIPANA, M., CUEVAS, C., PACO, G., SERRANO, V., ZYMLA, B., ... & GAMARRA, A. (2014). Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*, 71, 156-165.

MCGHEE, T.J., (1968). Low temperature anaerobic digestion, Ph.D. thesis, University of Kansas. University Microfilms, Ann Arbor, Michigan

MILLER, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*, 31(3), 426-428.

MOMOH, Y. O., & SAROJ, D. P. (2016). Development and testing of surface-based and water-based-diffusion kinetic models for studying hydrolysis and biogas production from cow manure. *Renewable Energy*, 86, 1113-1122.

MOSEY, F. E. (1983). Mathematical modeling of the anaerobic digestion process regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose. *Water Science and Technology* , 15(8-9):209-232. ISSN: 0273-1223.

NAYONO, S. E., WINTER, J., & GALLERT, C. (2010). Anaerobic digestion of pressed off leachate from the organic fraction of municipal solid waste. *Waste management*, 30(10), 1828-1833.

NEVES, L., OLIVEIRA, R., & ALVES, M. M. (2009). Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat. *Bioresource Technology*, 100(6), 1957-1962.

NOPHARATANA, A., PULLAMMANAPPALLIL, P. C., & CLARKE, W. P. (2007). Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. *Waste management*, 27(5), 595-603.

NOZHEVNIKOVA, A. N., ZEPP, K., VAZQUEZ, F., ZEHNDER, A. J., & HOLLIGER, C. (2003). Evidence for the existence of psychrophilic methanogenic communities in anoxic sediments of deep lakes. *Applied and environmental microbiology*, 69(3), 1832-1835.

NOZHEVNIKOVA, A. N., NEKRASOVA, V., AMMANN, A., ZEHNDER, A. J., WEHRLI, B., & HOLLIGER, C. (2007). Influence of temperature and high acetate concentrations on methanogenesis in lake sediment slurries. *FEMS microbiology ecology*, 62(3), 336-344.

NOZHEVNIKOVA, A., NEKRASOVA, V., KEVBRINA, M., & KOTSYURBENKO, O. (2001a). Production and oxidation of methane at low temperature by the microbial population of municipal sludge checks situated in north-east Europe. *Water Science & Technology*, 44(4), 89-95.

NOZHEVNIKOVA, A., SIMANKOVA, M., PARSHINA, S., & KOTSYURBENKO, O. (2011b). Temperature characteristics of methanogenic archaea and acetogenic bacteria isolated from cold environments. *Water Science & Technology*, 44(8), 41-48.

ORTEGA, N. M. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Universal-Publishers

PALATSI, J., LAURENI, M., ANDRÉS, M. V., FLOTATS, X., NIELSEN, H. B., & ANGELIDAKI, I. (2009). Strategies for recovering inhibition caused by long chain fatty acids on anaerobic thermophilic biogas reactors. *Bioresource technology*, 100(20), 4588-4596.

PARAMESWARAN, P., & RITTMANN, B. E. (2012). Feasibility of anaerobic co-digestion of pig waste and paper sludge. *Bioresource technology*, 124, 163-168.

PERRIGAULT, T., WEATHERFORD, V., MARTÍ-HERRERO, J., & POGGIO, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource technology*, 124, 259-268.

POMMIER, S., CHENU, D., QUINTARD, M., & LEFEBVRE, X. (2007). A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills. *Biotechnology and bioengineering*, 97(3), 473-482.

PURSER, B. J., THAI, S. M., FRITZ, T., ESTEVES, S. R., DINSDALE, R. M., & GUWY, A. J. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water research*, 61, 162-170.

RAZAVIARANI, V., BUCHANAN, I. D., MALIK, S., & KATALAMBULA, H. (2013). Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal wastewater sludge with restaurant grease trap waste. *Journal of Environmental Management*, 123, 26-33.

RIVERA, H. A., MALAVER, J. D., PEÑA, K. T., & MALAVER, M. N. (2012). *Perdurabilidad empresarial: el caso del sector avícola en Colombia. Borradores de Investigación: Serie documentos administración*, ISSN 0124-8219, No. 119 (Febrero de 2012).

RIVERO, O. C. (2012). *Monitorización y Evaluación comparativa de la tecnología de Biodigestión anaerobia como fuente de energía renovable en dos ámbitos familiar e industrial en Bolivia (Doctoral dissertation, Universidad Internacional de Andalucía)*.

SAFLEY, L. M., & WESTERMAN, P. W. (1992). Performance of a low temperature lagoon digester. *Bioresource Technology*, 41(2), 167-175.

SALMINEN, E., & RINTALA, J. (2002). Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 13-26.

SINGH, K. S. AND VIRARAGHAVAN, T. (2003) Impact of temperature on performance, microbiological, and hydrodynamic aspects of UASB reactors treating municipal waste water. *Water Science and Technology*, 48 (6), 211-217.

STETTER, K. O. (1985). Extrem thermophile bakterien. *Naturwissenschaften*, 72(6), 291-301.

SURENDRA, K. C., TAKARA, D., HASHIMOTO, A. G., & KHANAL, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.

SYAICHURROZI, I., BUDIYONO, & SUMARDIONO, S. (2013). Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 149, 390-397

VANEGAS, C., & BARTLETT, J. (2013). Anaerobic digestion of *Laminaria digitata*: The effect of temperature on biogas production and composition. *Waste and Biomass Valorization*, 4(3), 509-515.

ZENG, S., YUAN, X., SHI, X., & QIU, Y. (2010). Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of *Microcystis* spp. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1), 89-93.

ZHANG, W., WEI, Q., WU, S., QI, D., LI, W., ZUO, Z., & DONG, R. (2014). Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. *Applied Energy*, 128, 175-183

ZHUA, G., & JHA, A. K. (2013). Psychrophilic dry anaerobic digestion of cow dung for methane production: effect of inoculum. *Sci. Asia*, 39, 500-510.

ZHANG, J. S., SUN, K. W., WU, M. C., & ZHANG, L. (2005). Influence of temperature on performance of anaerobic digestion of municipal solid waste. *Journal of environmental sciences (China)*, 18(4), 810-815.

ANEXOS

ANEXO A. Protocolo de Toma de muestra de Gallinaza de Jaula (GJ)

Materiales:

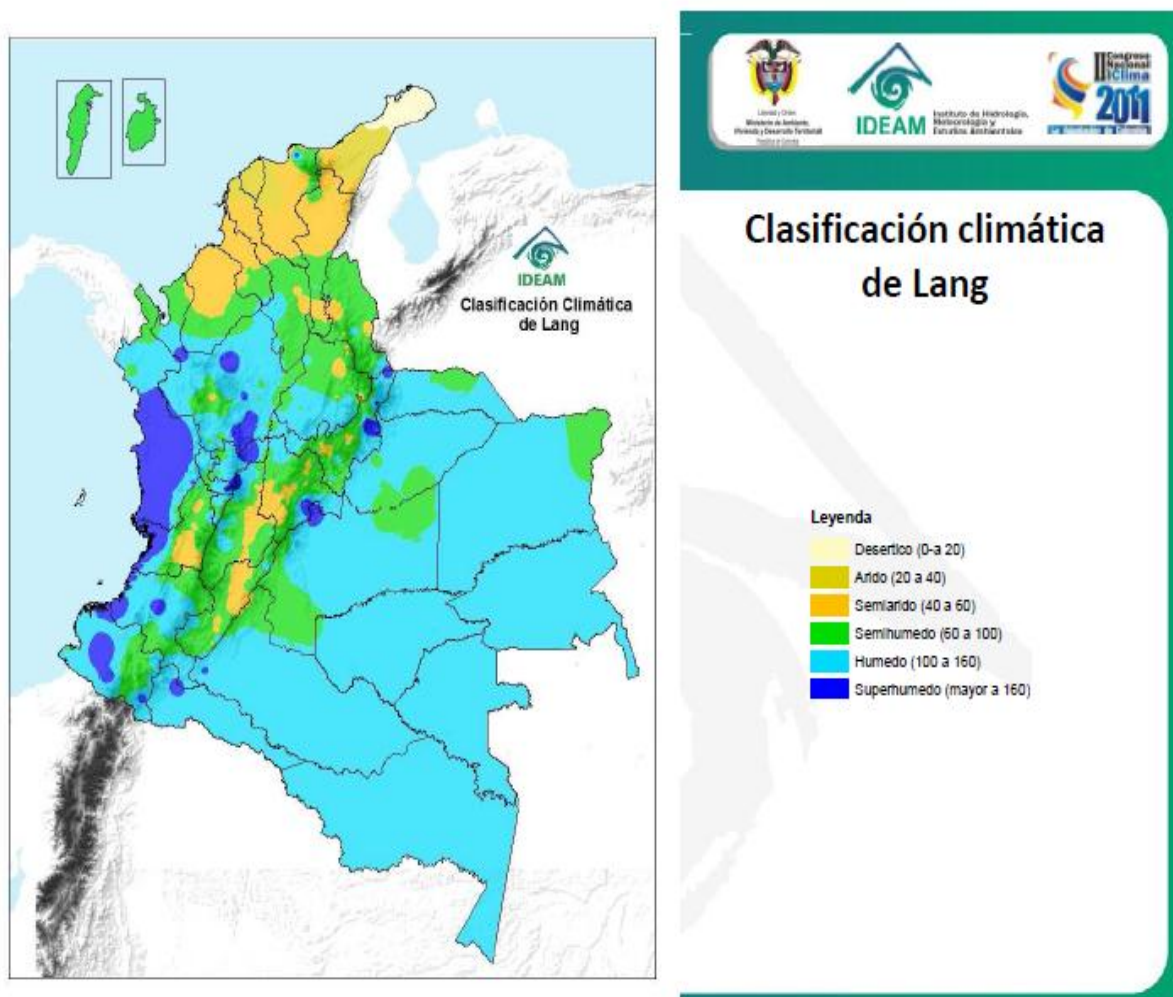
- Nevera de icopor
- Bolsa plástica con cierre hermético
- Cinta de enmascarar
- Espátula
- Recipientes plásticos de dos litros
- Guantes de látex
- Marcadores permanentes
- Tapabocas

Procedimiento:

Para la toma de muestras de gallinaza se deben realizar antes de ser llevada a la planta de abonos; preferiblemente en la jornada de la mañana.

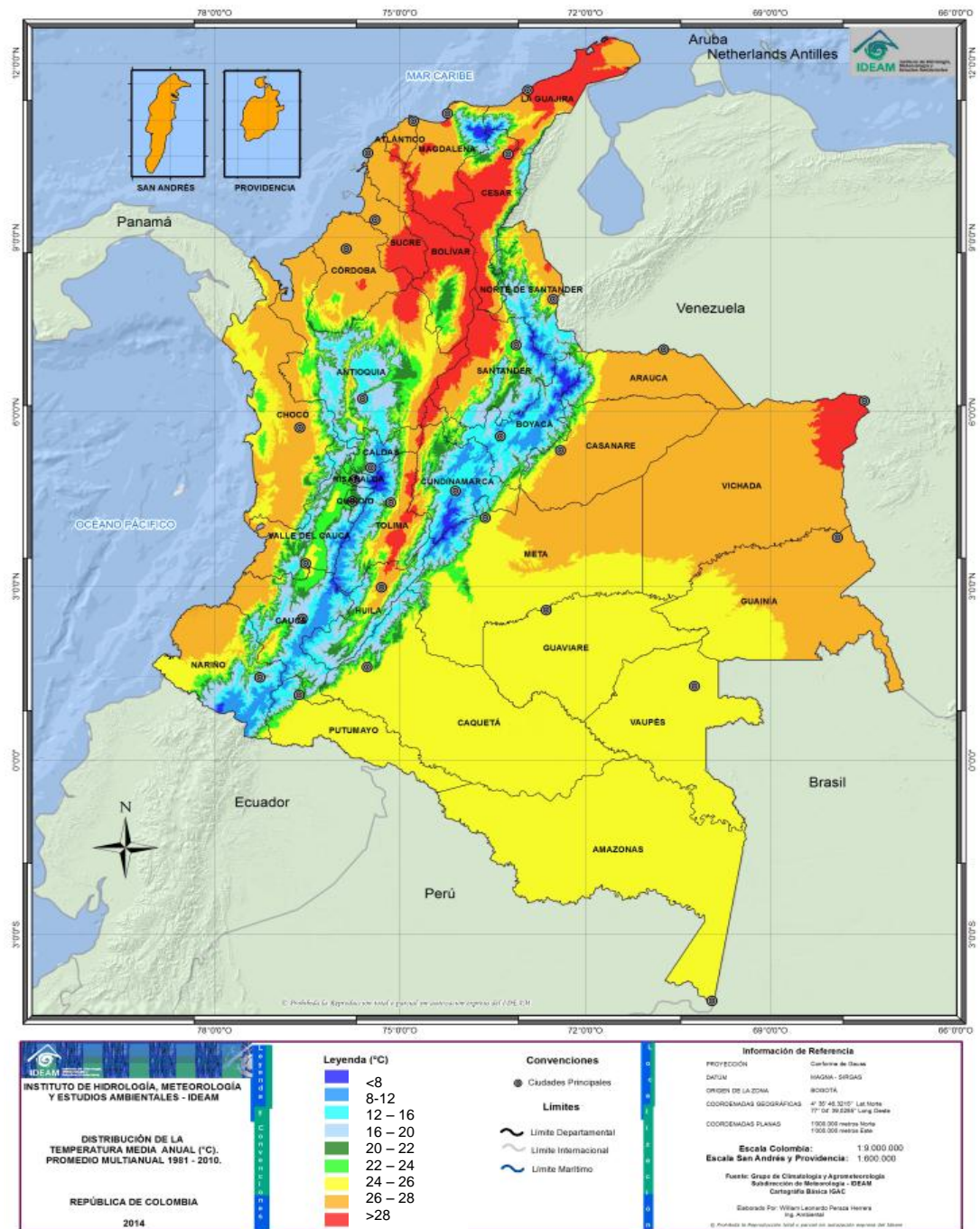
1. Con la espátula tomar las muestras de gallinaza hasta llenar la totalidad de las bolsas y cerrar inmediatamente.
2. Rotular las bolsas con las muestras con lugar y fecha de la toma de muestra.
3. Trasladar las muestras hasta el laboratorio en las cabas.
4. En el laboratorio envasar las muestras en recipientes plásticos y refrigerar.

ANEXO B. Clasificación Climática de Lang



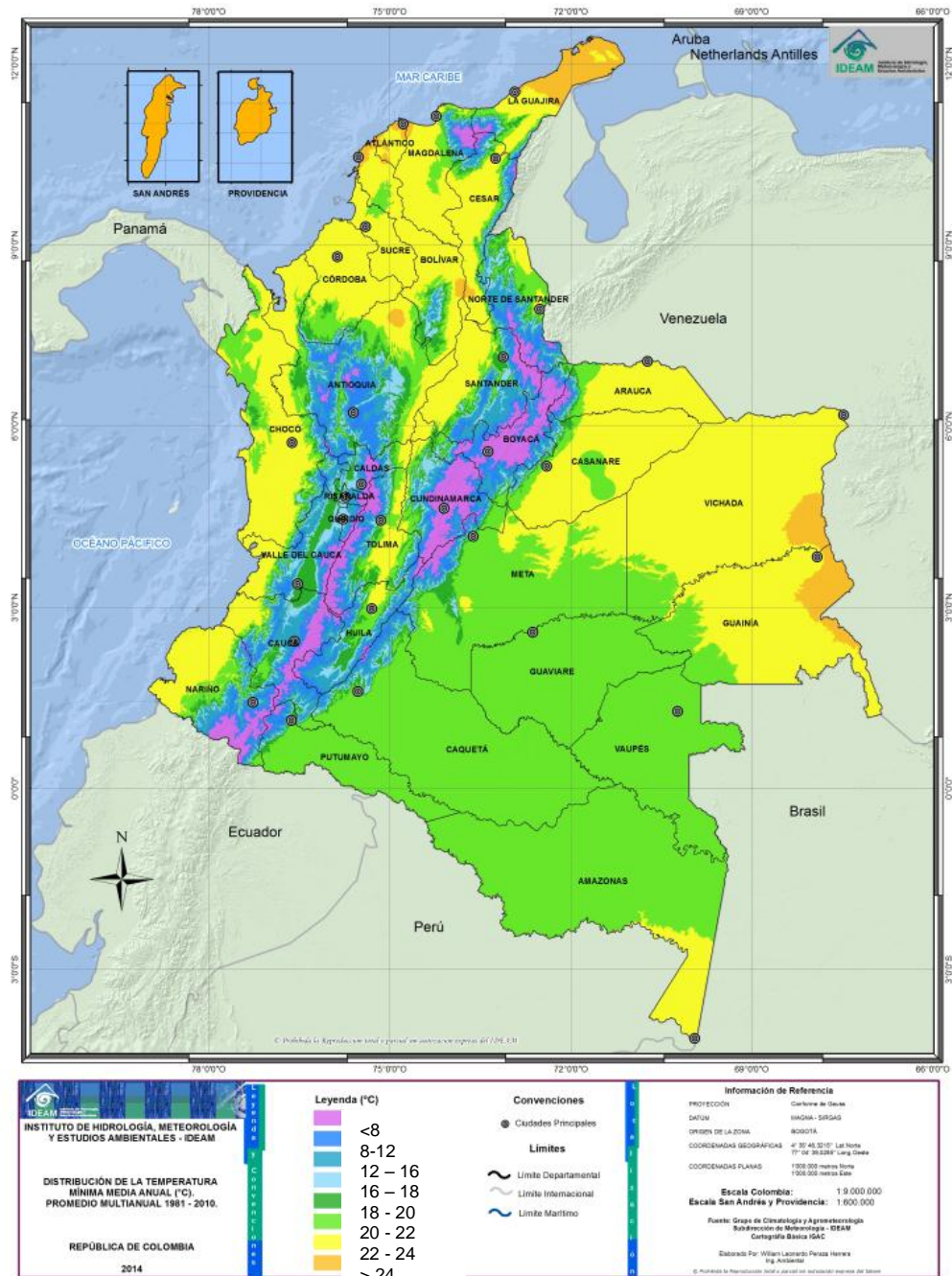
Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2011). Clasificaciones climáticas Colombia. Bogotá, D.C : IDEAM; INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 a). Anuario climatológico. Bogotá, D.C : IDEAM

ANEXO C. Distribución de la Temperatura Media Anual Promedio Multianual Durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.



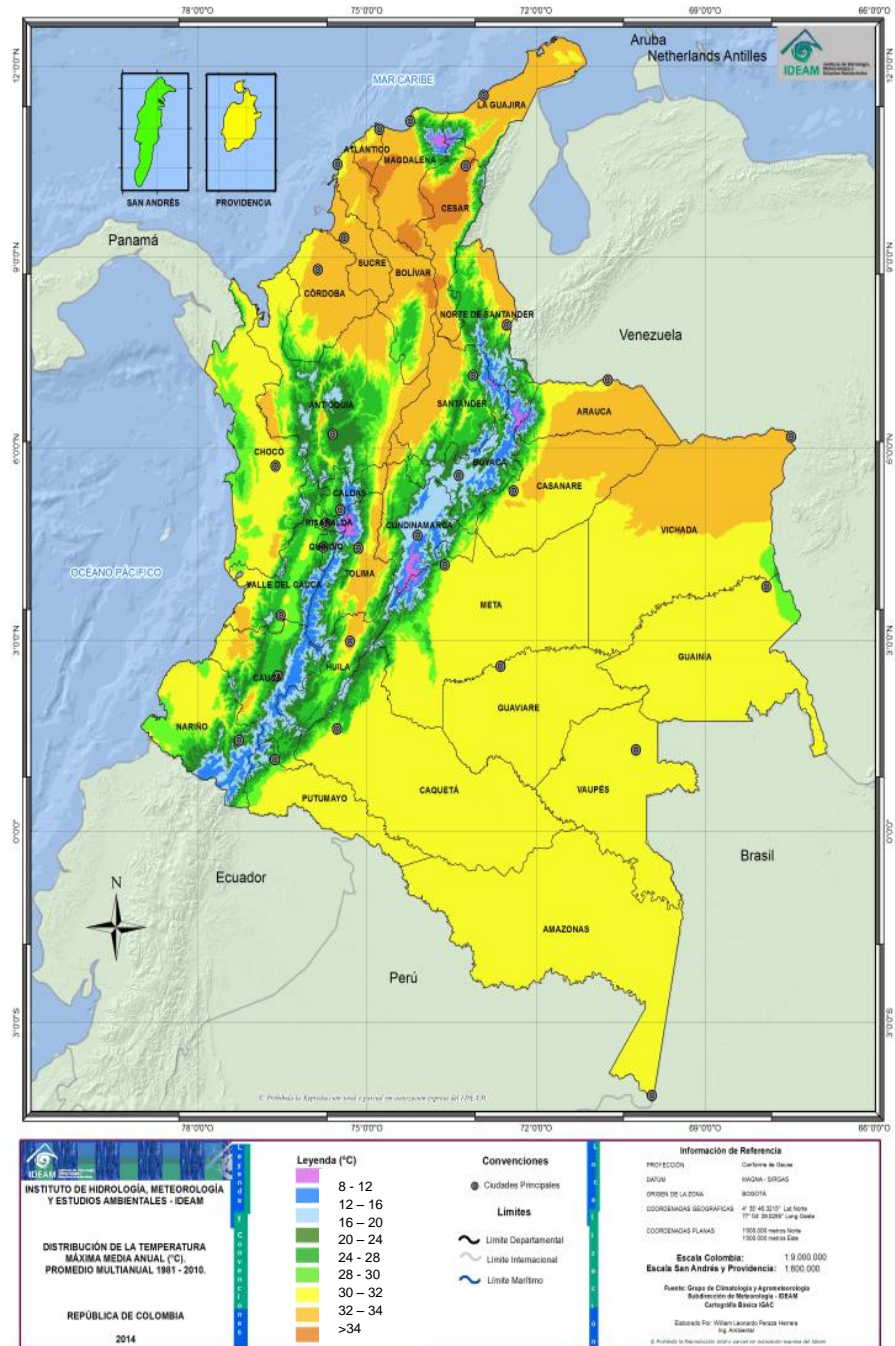
Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 b). Sistema de Información Ambiental SIA Gestión de Metadatos Institucional. Bogotá, D.C: IDEAM

ANEXO D. Distribución de la Temperatura Mínima Anual Promedio Multianual Durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 b). Sistema de Información Ambiental SIA Gestión de Metadatos Institucional. Bogotá, D.C : IDEAM

ANEXO E. Distribución de la Temperatura Máxima Anual Promedio Multianual Durante El Periodo 1981-2010. República De Colombia. Año 2014.



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA-IDEAM, (2014 b). Sistema de Información Ambiental SIA Gestión de Metadatos Institucional. Bogotá, D.C : IDEAM

ANEXO F. Determinación de la alcalinidad total, ácidos grasos volátiles y pH para la carga inicial y el efluente

Temperatura (°C)	CARGA INICIAL Alcalinidad total (mg/l)	EFLUENTE Alcalinidad total (mg/l)	CARGA INICIAL Àc. grasos volátiles (mg/l)	EFLUENTE Àc. grasos volátiles (mg/l)	CARGA INICIAL pH	EFLUENTE pH
10 °C	3350	4000	2520	540	7,62	6,152
10 °C (Inóculo adaptado)	4150	6300	2280	660	7,679	7,811
20 °C	3350	3450	2520	420	7,62	8,025
20 °C (Inóculo adaptado)	4150	3450	2280	720	7,679	7,890
25 °C	3350	3250	2520	360	7,62	7,881
30 °C	3350	2950	2520	360	7,62	7,895
35 °C	3350	2800	2520	420	7,62	8,098
37 °C	3350	2950	2520	360	7,62	7,866
39 °C	3350	2650	2520	420	7,62	7,772

ANEXO G. Determinación de DQO y la eficiencia de remoción de DQO para la carga inicial y el efluente

Temperatura (°C)	CARGA INICIAL Demanda Química de Oxígeno (DQO)	EFLUENTE Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Eficiencia de Remoción de DQO (%)
10 °C	6049,52	5781,57	11,13
10 °C (Inóculo adaptado)	6505,82	4934,99	18,42
20 °C	6049,52	4526,26	30,43
20 °C (Inóculo adaptado)	6505,82	3883,56	35,80
25 °C	6049,52	3402,99	47,69
30 °C	6049,52	2750,58	57,72
35 °C	6049,52	2201,07	66,17
37 °C	6049,52	1884,58	71,03
39 °C	6049,52	2102,05	67,69

ANEXO H. Determinación de ST, SV y la eficiencia de remoción de ST, SV para la carga inicial y el efluente

Temperatura (°C)	CARGA INICIAL Sólidos Totales (g/ Kg)	EFLUENTE Sólidos Totales (g/ Kg)	Eficiencia de Remoción de ST
10 °C	27,41	24,37	11,06
10 °C (Inóculo adaptado)	22,54	19,51	13,46
20 °C	27,41	21,52	21,47
20 °C (Inóculo adaptado)	22,54	17,23	23,55
25 °C	27,41	19,74	27,97
30 °C	27,41	17,76	35,18
35 °C	27,41	15,63	42,97
37 °C	27,41	13,39	51,16
39 °C	27,41	13,01	52,52

Temperatura (°C)	CARGA INICIAL Sólidos volátiles (g/ Kg)	EFLUENTE Sólidos volátiles (g/ Kg)	Eficiencia de Remoción de Sv
10 °C	14,047	12,223	12,986
10 °C (Inóculo adaptado)	14,934	12,739	14,698
20 °C	14,047	10,395	25,998
20 °C (Inóculo adaptado)	14,934	10,988	26,424
25 °C	14,047	9,870	29,737
30 °C	14,047	8,882	36,768
35 °C	14,047	7,928	43,559
37 °C	14,047	6,583	53,135
39 °C	14,047	6,421	54,290

ANEXO I. Determinación de los azúcares reductores totales (ART) para la carga inicial y el efluente

Temperatura (°C)	CARGA INICIAL Azúcares Reductores Totales[g ART/L]	EFLUENTE Azúcares Reductores Totales[g ART/L]	% Consumo de ART
10 °C	0,739	0,587	20,546
10 °C (Inóculo adaptado)	0,864	0,590	31,726
20 °C	0,739	0,503	32,000
20 °C (Inóculo adaptado)	0,864	0,501	41,991
25 °C	0,739	0,495	33,091
30 °C	0,739	0,469	36,546
35 °C	0,739	0,362	51,091
37 °C	0,739	0,339	54,182
39 °C	0,739	0,309	58,182

Nota: En la carpeta Anexos, se encuentra el soporte que respalda la información presentada en esta investigación.