



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Impacto del carbón activado en el rendimiento de la producción de biogás durante el proceso de Digestión Anaerobia.

Verónica Gaviria Restrepo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía
Medellín, Colombia
2023

Impacto del carbón activado en el rendimiento de la producción de biogás durante el proceso de Digestión Anaerobia.

Verónica Gaviria Restrepo

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

Magister en Ingeniería Química

Director (a):

Físico puro, Ing. Mecánico, PhD

Farid Chejne Janna

Codirector (a):

Ing. Biológica, MSC en Medio Ambiente y Desarrollo

Andrea Tamayo Londoño

Línea de Investigación:

Energías Alternativas

Grupo de Investigación:

Termodinámica Avanzada y Energías Alternativas (TAYEA)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, Departamento de Procesos y Energía

Ciudad, Colombia

2023

Dedicatoria

.

A mi mamá, Patricia y hermanita Juliana. Su apoyo y paciencia hicieron este logro posible.

*A mi familia y miembros del grupo TAYEA.
Especialmente al Profesor Farid, la Profesora Andrea, Michell, Marlon, Estefanía y Don Fernando por ayudarme en todas las etapas del proceso experimental.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Nombre

1/08/2023

Fecha

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por darme la paciencia y fortaleza para seguir adelante. Por permitirme conocer a todas las personas del grupo TAYEA; a ellos muchas gracias por sus valiosos consejos y ayuda ya que fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

A mi familia por su apoyo incondicional, consejos y cariño en todo momento. Especialmente a mi mamá y hermanita Juli por enseñarme a mirar a las dificultades con valentía sin dejarme vencer. A mi primo Alejo por apoyarme para poder cumplir con este objetivo.

A mis profesores Farid Chejne Janna y Andrea Tamayo Londoño
Por haberme guiado en este proyecto, en base a sus experiencias y sabiduría.
Ustedes educan con el corazón.

Resumen

Impacto del carbón activado en el rendimiento de la producción de biogás durante el proceso de Digestión Anaerobia.

En esta tesis se estudió el impacto de carbón activado en el rendimiento de la producción de biogás durante el proceso de digestión anaerobia. Inicialmente se produjo Carbón Activado (CA) a partir de cuesco de palma, para ser adicionado a un proceso de digestión anaerobia (DA) empleando celulosa como sustrato sintético. Posteriormente, se realizaron ensayos con celulosa y CA comercial como patrón de referencia para determinar la dosis que mejora la producción de biogás. Finalmente, se utilizó la dosis adecuada en un último montaje con desechos de alimentos.

La producción del CA se realizó transformando térmicamente cuesco de palma mediante pirólisis en un horno horizontal rotatorio con flujo de nitrógeno 100mLmin^{-1} a 550°C obteniendo biochar de área superficial específica de $555,48\text{ (m}^2\text{g}^{-1}\text{)}$. Gasificándolo en el mismo horno con flujo de CO_2 100mLmin^{-1} a 850°C obteniendo 216 gramos de CA de $811,64\text{ (m}^2\text{g}^{-1}\text{)}$.

Los ensayos de DA se desarrollaron empleando el esquema de Potencial Bioquímico Metanogénico, utilizando reactores batch de 1.1 L, y un sistema de desplazamiento de volumen de solución de NaOH para la medición del metano. Para determinar la dosis de CA, se realizó ajuste de curva de los datos obtenidos con respecto a la Función Logística (FL), Modificado de Gompertz (GM) y Roediger encontrando una tasa máxima de producción de biogás acumulada 1.1 L/gSV con 25g de CA cuesco utilizando residuos de alimentos y 0.23 L/gSV sin CA.

A partir de los resultados obtenidos, se determinó que CA posee grupos funcionales y estructuras porosas que facilitaron la transferencia de electrones entre los diferentes grupos microbianos lo cual favoreció la producción de biogás.

Palabras clave: Carbón Activado (CA), Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM), biogás y microorganismos metanogénicos.

Abstract

Impact of activated carbon on biogas production performance during the anaerobic digestion process

In this thesis, the impact of activated carbon on biogas production performance during the anaerobic digestion process was researched. Initially, activated carbon (AC) was produced from palm hulls to be added to an anaerobic digestion (AD) process using cellulose as a synthetic substrate. Subsequently, tests were carried out with cellulose and commercial AC as a reference standard to determine the dose that improves biogas production. Finally, the suitable dose found in a final set-up with food waste was used.

The production of CA was achieved by thermally transforming palm kernel by pyrolysis in a horizontal rotary kiln with nitrogen flow of 100mLmin^{-1} a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, obtaining biochar with a specific surface area of $555,48\text{ (m}^2\text{ g}^{-1}\text{)}$. It was gasified in the same oven with dioxide of carbon flow of 100mLmin^{-1} and $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, obtaining 216 grams of CA of $811,64\text{ (m}^2\text{ g}^{-1}\text{)}$.

The DA tests were developed using the Methanogenic Biochemical Potential scheme, using 1.1 L batch reactors, and a NaOH solution volume displacement system for methane measurement. To determine the dosage of CA, curve fitting of the data obtained concerning the Logistic Function (LF), Modified Gompertz (GM), and Roediger was performed, finding a maximum biogas production rate of 1.1 L/gSV with 25g of CA using food waste and 0.23 L/gSV without CA. From the results obtained, it was determined that CA has functional groups and porous structures that facilitated the transfer of electrons between the different microbial groups, which favored the production of biogas.

Keywords: (Activated carbon, Biochemical Methane Potential (BMP), biogas, and methanogenic microorganisms).

Contenido

Resumen	IX
Abstract	XI
Contenido	XIII
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XX
Introducción	1
Marco teórico	5
1. Carbón Activado	11
1.1 Metodología	13
• Producción y activación del biochar	14
• Caracterización fisicoquímica	14
• Propiedades superficiales	15
1.2 Resultados y Discusiones	16
• Producción y activación del biochar	17
• Caracterización fisicoquímica del carbón activado.....	18
• Análisis último (CHN) de carbón activado producido con biochar (A), carbón activado comercial (B) y biochar (C).....	20
• Propiedades superficiales del biochar activado(A) y carbón activado comercial (B) utilizando los adsorbentes N ₂ y CO ₂	21
1.3 Conclusiones parciales	21
2 Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM)	22
2.1 Metodología	23
2.1.1 Descripción de los ensayos experimentales.	26
• Montaje 1	27
• Montaje 2.....	31
• Montaje 3.....	33

• Montaje 4	34
2.1.2 Modelos teóricos predictivos de Potencial Bioquímico Metanogénico	38
2.1.3 Análisis estadístico de resultados obtenidos en cada montaje experimental.	41
2.2 Resultados de las mediciones experimentales.....	42
• Montaje 1	42
• Montaje 2	43
• Montaje 3	45
• Montaje 4	46
2.2.1 Verificación de modelos teóricos	47
• Montaje 1	47
• Montaje 2	48
• Montaje 3	49
• Montaje 4	49
2.2.3 Análisis comparativo de los diferentes resultados experimentales.....	51
2.3 Conclusiones y Recomendaciones	57
3. Anexos A: Parámetros cinéticos Montaje 1	59
Anexo B : Inspección visual M1	60
Anexo C: Parámetros cinéticos Montaje 2	62
Anexo D: Inspección visual M2.....	64
Anexo E: Parámetros cinéticos Montaje 3	66
Anexo F: Inspección visual M3	67
Anexo G: Parámetros cinéticos Montaje 4.....	70
Anexo H: Inspección visual M4.....	71
Anexo I: Esquema de reactores batch utilizados para determinar el PBM	73
Anexo J: Reactor batch inoculado con 25g CA cuesco de palma y residuos orgánicos de alimentos.	73
Anexo K: Reactor batch inoculado con 10, 15, 20 CA cuesco de palma y celulosa.	75
Anexo L: Reactor batch inoculado con 15, 20, 25 CA cuesco de palma y celulosa.	76
Anexo M: Reactor batch inoculado con 20 y 25 g CA cuesco de palma con celulosa	77
4. Bibliografía	77

Lista de figuras

	Pag
Figura 0-1 Proceso de digestión anaerobia en 4 fases o etapas; hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa Metanogénica. Fuente: Esquema modificado de Moreno et al., (2011)	6
Figura 1-1 Estructura del carbón activado a. Posición de láminas y b. Estructura porosa y química. Nombre de la fuente: Imagen a. Garche., (2009) b. Sultana., et al (2022).....	11
Figura 1-2 Carbonizado obtenido después de activar el biochar a. muestras almacenadas en bolsas ziploc de carbón activado comercial b., carbón activado de biochar c. biochar d.	18
Figura 1-3 Medición de grupos funcionales (FTIR) de carbón activado producido con biochar (línea negra), y biochar (línea roja).	19
Figura 1-4 Distribución de tamaño de poro del carbón activado producido con biochar (A) utilizando CO ₂ como adsorbato	22
Figura 1-5 Distribución de tamaño de poro del carbón activado producido con biochar (A) utilizando N ₂ como adsorbato. Nota: P/Po: presión del adsorbato N ₂ / presión total del sistema.....	23
Figura 1-6 Tamaño de los poros y volumen de poros específicos biochar activado (A). 24	
Figura 1-7 Distribución de tamaño de poro del carbón activado comercial (B) utilizando CO ₂ como adsorbato.	25
Figura 1-8 Distribución de tamaño de poro del carbón activado comercial (B) utilizando N ₂ como adsorbato.....	26
Figura 1-9 Tamaño de los poros y volumen de poros específicos del carbón activado comercial (B).	26
Figura 2-1 Volumen del recipiente utilizado para la prueba de biodegradabilidad anaeróbica. Frasco ámbar de 1100 mL. Nombre de la fuente: Elaboración propia.....	28

Figura 2-2 Esquema reactores batch inoculados por duplicado a partir de frascos con carbón activado y sustrato sintético a concentraciones de 10, 15 y 20 g/L. Fuente: Elaboración propia 31

Figura 2-3 Volúmenes utilizados para la prueba de biodegradabilidad anaeróbica de los desechos orgánicos de alimentos con carbón activado comercial y cuesco de palma. Nombre de la fuente: Elaboración propia 35

Figura 2-4 PBM acumulado para los tratamientos A1 () (inóculo y agua), C1 () (inóculo y celulosa), CC10-com () (inóculo, celulosa y 10g/L de CA comercial), CCM1 () (inóculo, celulosa y 15g/L de CA comercial), y CCA1 () (inoculo, celulosa y 20g/L de CA comercial). 43

Figura 2-5 PBM acumulado A2 () (inoculo y agua), C2 () (inoculo y celulosa), 25CA () (inoculo, celulosa y 25g/L de CA comercial), CCM2 () (inoculo, celulosa y 30g/L de CA comercial), y CCA2 () (inoculo, celulosa, 35g/L de CA comercial). 44

Figura 2-6 PBM acumulado A3 () (inoculo y agua), C3 () (inoculo y celulosa), 10CAc () (inoculo, celulosa y 10g/L CA cuesco), 15CAc () (inoculo, celulosa y 15g/L CA cuesco), 20CAc () (inoculo, celulosa y 20g/L CA cuesco) y 25CAc () (inoculo, celulosa, 20g/L CA cuesco). 45

Figura 2-7 PBM de metano acumulado para tratamientos A () (inoculo y agua), IR () (inoculo y residuos orgánicos de comida), 25CA cm () (inoculo, residuos y 25g/L de CA comercial) y 25CAcp () (inoculo, residuos y 25g/L de CA cuesco palma). 46

Figura 2-8 Comparación de montajes 1 y 2 mediante el análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de CA) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte en el día 53 con 10,15,20,25,30 y 35g/L CA comercial .. 52

Figura 2-9 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de carbón activado) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 53 en los tratamientos 10, 15, 20gramos de CA comercial. 53

Figura 2-10 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de carbón activado comercial) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 53 en los tratamientos 25,30,35 gramos CA comercial 54

Figura 2-11 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de carbón activado de cuesco) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 58 en los tratamientos 10,15,20 y 25 gramos CA cuesco 55

Figura 2-12 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (25g/L de dosis CA cuesco y CA comercial) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 58 en los tratamientos con residuos de alimentos 56

Figura 0-1 Anexo M1.1 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos con las dosis 10,15 y 20g/L CA comercial 60

Figura 0-1 Anexo M2.2 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Gompertz y Logístico para tratamientos con las dosis 25,30 y 35g/L CA comercial 64

Figura 0-1 Anexo M3.3 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20,25g/L con celulosa y CA cuesco de palma..... 67

Figura 0-1 Anexo M4.4 Inspección visual de los parámetros cinéticos con los modelos Gompertz y Logístico A4 (inoculo y agua), IR4 (inoculo y residuos orgánicos), 25CA cm (inoculo, residuos y 25g/L CA comercial) y 25 CAcp (inoculo, residuos y 25g/L CAcuesco) 71

Lista de tablas

	Pag
Tabla 0-1 Cantidad de residuos orgánicos según las principales ciudades del país.....	1
Tabla 1-1 Metodología aplicada según las propiedades superficiales seleccionadas del CA con el sortómetro BET	16
Tabla 1-2 Relación de los gramos de cuesco de palma transformados a biochar por pirólisis lenta.....	17
Tabla 1-3 Grupos funcionales identificados por FT-IR en muestras de carbón activado identificadas por Álvarez., (2019) y Tello., (2018).	18
Tabla 1-4 Análisis próximo de las muestras y contenido material volátil y carbono correspondientes a CA-BC , CA-com y BC.	20
Tabla 1-5 Análisis último (CHN) de carbón activado producido con biochar, carbón activado comercial y biochar	20
Tabla 1-6: Resultados obtenidos de las propiedades superficiales correspondientes al área superficial, volumen y distribución de tamaño de poro de las muestras calculadas con el sortómetro BET utilizando los adsorbentes N ₂ y CO ₂	21
Tabla 2-1: Resumen de las condiciones experimentales evaluadas en este estudio.....	26
Tabla 2-2 Parámetros experimentales del Potencial bioquímico Metanogénico.	29
Tabla 2-3 Descripción de parámetros experimentales del montaje de Potencial bioquímico Metanogénico con 25 g,30 g,35g de carbón activado comercial.	32
Tabla 2-4 Descripción del montaje de Potencial bioquímico Metanogénico junto de carbón activado de cuesco de palma.....	33
Tabla 2-5 Registro de los cálculos de la mezcla residuos con inóculo.	35
Tabla 2-6 Parámetros experimentales de Potencial bioquímico Metanogénico con los tratamientos 25 gramos de carbón activado de cuesco y comercial con residuos orgánicos de restaurante.....	37

Tabla 2-7 Nombre del modelo, tipo de ecuación y parámetros.....	38
Tabla 3-1 Anexo M1 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20g/L CAcomercial y celulosa.....	59
Tabla 0-1 Anexo M2 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 25,30,35g/L CAcomercial y celulosa.....	62
Tabla 0-1 Anexo M3 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20,25g/L CA-BC	66
Tabla 0-1 Anexo M4 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 25 g/L CA comercial y 25g/L CA cuesco de palma utilizando en ambos casos residuos orgánicos.....	70

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
PBM	Potencial Bioquímico Metanogénico	$\frac{L \text{ Biogás}}{g \text{ SV}}$	ecuación 1
$V_{TCH_4} CE$	Volumen total de metano en condiciones estándar de Presión (1 atm) y temperatura (273K).	L	ecuación 2
$V_{CH_4} \text{ control}$	Volumen de metano producido por el inóculo sin sustrato	L	ecuación 2
$V_{CH_4} CE$	Volumen de metano en Condiciones estándar	L	ecuación 3
R	Constante de los gases ideales (0,082 atmLK ⁻¹ mol ⁻¹).	N.A	ecuación 3
$T_e CE$	Temperatura a condiciones estándar (273,15 K)	K	ecuación 3
$P CE$	Presión a condiciones estándar (1 atm)	atm	ecuación 3
$PM CH_4$	Peso Molecular de metano (16.04 g mol ⁻¹)	gmol ⁻¹	ecuación 4
$V_{CH_4} \text{ dis } CE$	Volumen de metano disuelto en condiciones estándar	L	ecuación 5
$n_{CH_4} \text{ dis}$	Moles de metano disuelto	mol	ecuación 6
V_u	Volumen útil del reactor	L	ecuación 7
$M_{CH_4} \text{ dis } CE$	Concentración molar de metano disuelto	molL ⁻¹	ecuación 8

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
M_{H_2O}	Concentración molar del agua	molL ⁻¹	ecuación 8
$X_{CH_4\ dis}$	Fracción molar de metano disuelto	molL ⁻¹	ecuación 9
ΔP	Incremento de la presión	atm	ecuación 9
H_{CH_4}	Constante de Henry para el CH ₄	atm	ecuación 10
T_e	Temperatura del experimento	K	ecuación 10
SV	Sólidos volátiles iniciales del sustrato	g SV	ecuación 10
ST	Sólidos totales	gL ⁻¹	ecuación 11
$Vol_m(L)$	Volumen de la muestra	L	ecuación 11
SV	Sólidos volátiles	gL ⁻¹	ecuación 12
$gSVi$	Gramos de sólidos volátiles del inóculo	g	ecuación 13
RIS	Relación Inóculo Sustrato	gg ⁻¹	ecuación 14
$G_{(t)}$	Producción acumulada de metano en un tiempo	m ³ Kg ⁻¹ SV ⁻¹	Tabla 2-7
G_o	Máxima producción de metano acumulada	m ³ Kg ⁻¹ SV ⁻¹	Tabla 2-7
$R_{máx}$	Máxima velocidad de producción de metano	m ³ Kg ⁻¹ SV ⁻¹ d	Tabla 2-7
t	Tiempo de incubación.	d ⁻¹	Tabla 2-7
G	Volumen del gas metano acumulado en el tiempo.	L	Tabla 2-7
G_m	Volumen de metano acumulado máximo obtenido en un tiempo infinito de la digestión.	L	Tabla 2-7
k	Constante cinética aparente para la producción de metano.	d ⁻¹	Tabla 2-7
t	Tiempo de operación.	d ⁻¹	Tabla 2-7

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$DW_{i(g)}$	Gramos de peso seco del inóculo	g	Tabla 2-5
$DW_{r(g)}$	Gramos de peso seco del residuo	g	Tabla 2-5
$H_{i(\%)}$	Porcentaje de humedad del inóculo	%	Tabla 2-5
$m_{r(g)}$	Masa del residuo (24g)	g	Tabla 2-5
$m_{i(g)}$	Masa del inóculo (550g)	g	Tabla 2-5
$P_{SV(gr)}$	Peso de los sólidos volátiles	g	Tabla 2-5
$P_{ST(gr)}$	Peso de los sólidos totales	g	Tabla 2-5
$Vol_{r(ml)}$	Volumen del residuo	ml	Tabla 2-5
$Vol_{i(ml)}$	Volumen del inóculo	ml	Tabla 2-5

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
n	Moles de metano	mol	ecuación 3 ecuación 4
ρ	Densidad	g ml ⁻¹	ecuación 4
λ	Tiempo de adaptación del inóculo al sustrato	d	Tabla 1-1

Subíndices

Subíndice	Término
CH_4	Metano
DR	Dubinín-Radushkevich

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia
e	Exponencial (1) =2,7183

Abreviaturas

Abreviatura Término

W1	Peso del crisol vacío
W2	Peso de la muestra después de calentar a 105 °C
W3	Peso de la muestra incinerada a 550 °C
CA	Carbón Activado
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
Vol. m	Volumen de la muestra
NTC	Norma Técnica Colombiana
A	Inóculo
C	Celulosa
CCB	Concentración baja de carbón activado
CCM	Concentración media de carbón activado
CCA	Concentración alta de carbón activado
NaOH	Hidróxido de sodio
CO ₂	Dióxido de sodio
TGA	Análisis Termo Gravimétrico
KBr	Bromuro de potasio
N ₂	Dinitrógeno
p/p0	Rango de presión relativa
BET	Brunauer – Emmett – Teller
TFDLN	Teoría del funcional de densidad no local.
PAT	Punto de adsorción total
K	Constante cinética aparente para la producción de metano
R ₂	Coefficiente de determinación
ECM	Error Cuadrático Medio
FL	Función logística

Abreviatura Término

GM Gompertz

O-H Grupo hidroxilo

R Replica

Introducción

En general el 10% de los residuos orgánicos van a botaderos a cielo abierto, 3% a plantas de recuperación, 2% a incineración y en un 80% suelen ser enterrados como principal medida de solución sanitaria en Colombia, la cual ha perdido viabilidad debido a que los rellenos sanitarios están llegando a su capacidad máxima. No obstante, existen alternativas de transformación como la digestión anaerobia aplicadas para obtener valiosos recursos: energía y bioabono (UPME., 2018) a partir de la fracción orgánica de los residuos domésticos generado en las diferentes ciudades de Colombia (Medellín, C. R. S. (2019)).

Los residuos orgánicos de alimentos y poda poseen una fracción orgánica entre 50% y 60% en masa total, lo cual lo hace atractivo para ser aprovechado en procesos de metanación vía digestión anaeróbica (Andrade *et al.*, 2018). En cuanto a la cantidad de residuos orgánicos generados de acuerdo con la población del país, Bogotá ocupa el primer lugar con 37000 Ton/año, seguido de Cali 20000 Ton/año y en tercer lugar Medellín con 16000 Ton/año (ver Tabla 0-1) ; adicionalmente, en Medellín los residuos orgánicos y putrescibles son los que predominan en un 40%, seguido de residuos ordinarios e inertes con promedio de 20% y en tercer lugar los residuos plásticos con un 11,74% (Plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) (2019)).

Tabla 0-1 Cantidad de residuos orgánicos según las principales ciudades del país

Ciudad	Población	Ton /año
Bogotá	8.000.000	37000
Medellín	3.500.000	16000

Cali	3.000.000	20000
Barranquilla	2.000.000	10000
Bucaramanga	1.000.000	10000
Cartagena	1.000.000	1300

NOTA: Recuperado del seminario virtual ASPA Chejne, J.F. *Bioeconomy a living and biodiverse Colombia* (24-26 de noviembre de 2018).

La digestión anaerobia (DA) hace parte del grupo de las tres tecnologías más utilizadas en la gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) las cuales son incineración, compostaje y DA respectivamente (Abbasi *et al.*, (2012)). Es considerada como una alternativa mucho más viable para el aprovechamiento de FORSU, debido a que, se puede almacenar energía en forma de biogás, el cual tiene un poder calorífico de 5137 kcal/U.M (Kilocalorías/unidades de masa) mayor que la madera, y combustibles como el lignito, briquetas de polvo de carbón entre otros (Dobre *et al.*, (2014)). A su vez la Corporación alemana de biogás., (2018), reportó que se pueden producir fertilizantes para ser utilizado en la agricultura y horticultura a partir del digestato como resultado de la DA.

En el caso particular tanto de la incineración como del compostaje, estos presentan puntos en común con la DA, en el caso de la incineración se logra una recuperación energética y no un aprovechamiento de nutrientes, mientras que el compostaje, ofrece la posibilidad de recuperar nutrientes de los desechos orgánicos, pero no energía (Corporación Alemana al Desarrollo Sustentable (GIZ., 2017)).

La gestión de desechos vía DA permite convertir la FORSU en recursos – biogás - como consecuencia del proceso en el que se consume biomasa, según lo afirma J. Fernández., (2010). Permitiendo a su vez, obtener materia prima secundaria a partir de la hidrólisis para desarrollar biomateriales, aditivos de comida, bioplásticos y fertilizantes según el informe uso óptimo de biogás elaborado por la European Commission., (2020).

De esta forma, a través de su implementación se convierte en una alternativa viable que aliviana la situación crítica de los rellenos sanitarios debido a que se encuentran con baja capacidad de almacenamiento y generan gases de efecto invernadero que son emitidos a la atmósfera. Por lo tanto, mediante el uso de DA se mitigan algunas falencias del sistema de gestión actual implementando una estrategia que da manejo a las FORSU, reduciendo la generación de olores y la proliferación y transmisión de enfermedades en las comunidades cercanas como lo reporta GIZ., (2017).

Por otro lado, durante el proceso de digestión anaerobia se forman compuestos como los Ácidos Grasos Volátiles (AGV) - precursores de la metanogénesis - pero que, al acumularse en el sistema por desequilibrios en las cinéticas microbianas, actúan como inhibidores de la producción de metano ya que su acumulación se traduce en una acidificación del proceso, por lo que su cuantificación y control ha sido un punto de interés en ésta área del conocimiento. En ese sentido, en estudios recientes como los realizados por Jiang *et al.*, (2021) y H. Chunhuahe *et al.*, (2021) resaltan como el uso de carbón activado (CA) es una alternativa efectiva para solucionar este problema, debido a que tiene la capacidad de promover la degradación de los AGV de 5 a 10 días, asociado al enriquecimiento en su superficie del microbiota metanogénico y fermentativo, mejorando la cinética de degradación del sustrato y la producción de metano.

Por otro lado, Yan *et al.*, (2020), Yu *et al.*, (2020b) y Zhang *et al.*, (2020) indican que aún no se ha estudiado con profundidad y detalle la colonización bacteriana en los poros del carbón activado y puntualizan que se debe investigar la importancia del carbón activado en la mejora de la DA de los desechos orgánicos de alimentos. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se estudió el impacto de carbón activado en el rendimiento de la producción de biogás durante el proceso de digestión anaerobia.

Marco teórico

La digestión anaerobia (DA) según T.Muller *et al.*, (2012) se define como una serie de procesos biológicos, donde los microorganismos descomponen el material biodegradable en ausencia de oxígeno para producir biogás el cual se constituye principalmente de metano CH₄ (50-75%), CO₂ (25-45%) y otros compuestos en menor proporción. Además, se obtiene digestato; un material que queda después de DA compuesto por agua, nitrógeno, fósforo, potasio y la formación de carbono residual del material utilizado como fuente de alimentación según citó Sánchez J.M., (2019).

En ese sentido, la materia orgánica será digerida según la velocidad de crecimiento y temperatura de los microorganismos involucrados, ya que diferentes tipos de microorganismos requieren un tiempo diferente para degradar la materia orgánica. De esta manera, a medida que aumenta la temperatura dentro del sistema, aumentará la velocidad de degradación de la biomasa para obtener metano el cual puede ser utilizado como fuente de energía (Moreno *et al.*, (2011) y Rasapoor *et al.*, (2021)).

Durante la DA la biomasa sufrirá un proceso de conversión biológica, la cual se caracteriza por tener un número de reacciones bioquímicas, muchas de las cuales pueden ocurrir de forma simultánea a cargo de diferentes tipos de microorganismos involucrados. Estudios bioquímicos y microbiológicos dividen el proceso de DA en 4 fases o etapas; hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica (Moreno *et al.*, (2011)). Las cuales se presentan en la Figura 0-1.

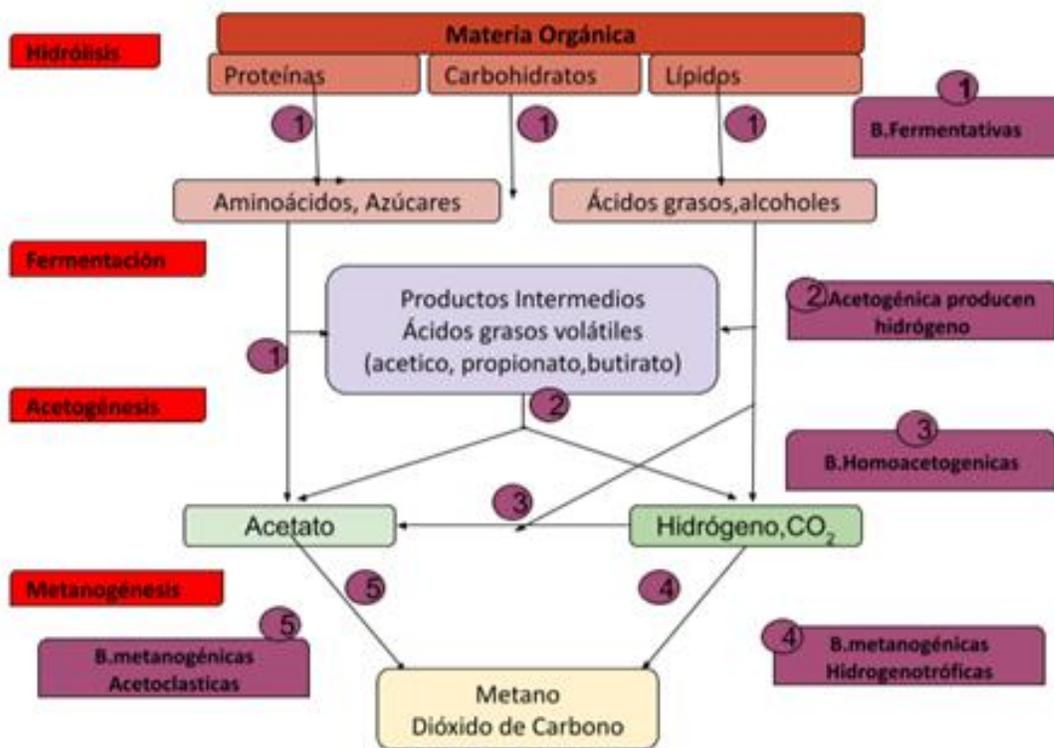


Figura 0-1 Proceso de digestión anaerobia en 4 fases o etapas; hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa Metanogénica. Fuente: Esquema modificado de Moreno et al., (2011)

La hidrólisis es la primera fase de la digestión anaerobia. Se caracteriza por ser una de las fases determinantes en la velocidad de reacción de los procesos biológicos. En la cual son hidrolizadas las moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos en moléculas simples gracias a las enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos. Por lo tanto, las moléculas hidrolizadas podrán atravesar con facilidad su pared celular proporcionando así los sustratos orgánicos para la digestión anaerobia.

Etapa acidogénica o fermentativa, las bacterias fermentativas podrán tomar dos vías dependiendo de los compuestos solubles disponibles en el medio. En el caso de compuestos como aminoácidos y azúcares se degradan hasta formar acetato vía fermentativa. Y por vía oxidación anaerobia degradaran ácidos grasos y alcoholes en hidrógeno y CO₂.

En el transcurso de ambas vías se formarán productos intermedios como ácidos volátiles (propionato, butirato), alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono, amonio y sulfuro.

Posteriormente, las bacterias acetogénicas transformarán los ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos en compuestos como acetato e hidrógeno.

En el caso particular de la formación de acetato; bacterias homoacetogénicas también presentes tienen la capacidad de producir como único producto acetato aprovechando la formación de hidrógeno como sustrato. Además, gracias al metabolismo de tipo específico de bacterias acetogénicas pueden reducir la presión parcial del hidrógeno haciendo que prevalezca una relación simbiótica estable entre las bacterias acetogénicas y metanogénicas evitando su acumulación.

Finalmente, un amplio grupo de bacterias anaerobias estrictas actúan sobre los productos resultantes de las fases anteriores conocidos como microorganismos metanogénicos considerados los más importantes del consorcio de microorganismos anaerobios ya que son los responsables de la formación de metano completando así el proceso de DA. A su vez, dependiendo del sustrato principal se presentan dos grandes grupos de microorganismos metanogénicos para la formación de metano; el primer grupo son las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas que utilizan mezclas de H_2/CO_2 y un segundo grupo donde se encuentran las bacterias metanogénicas acetoclásticas las cuales a partir de acetato producen metano.

Por otro lado, durante el proceso de digestión anaerobia se producen Ácidos Grasos Volátiles (AGV), utilizados por los microorganismos para generar metano. No obstante, diferentes autores reportaron, que al no ser controlados oportunamente pueden afectar negativamente la producción de metano. A continuación, se citan algunos reportes principales encontrados en la literatura con respecto a la producción de AGV y los efectos negativos de su acumulación.

Según M. T. V. Moreno., (2011) indicaron que los AGV, están constituidos por cadenas carbonatadas de menos de 6 carbonos lo cual les confiere la característica de volatilidad. Normalmente en sistemas de digestión anaerobia óptimos, los AGV se encuentran a bajas concentraciones. Indicando que a concentraciones entre 30-60 mg/L de AGV en forma no ionizada, este inhibe las bacterias metanogénicas.

Arango y Sánchez., (2009) por su parte indicaron que, los AGV son productos metabólicos, generados en la acidogénesis por las bacterias facultativas y obligatorias, que absorben los monómeros generados en la hidrólisis de la materia orgánica, para degradarlos

principalmente en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes (metano, etanol), Hidrógeno y CO₂.

R.A Huertas., (2015) reportó que no todos los productos obtenidos en la fase acidogénica son convertidos directamente a metano por las bacterias metanogénicas. Por consiguiente, se convierten en sustratos metanogénicos, ácidos grasos volátiles y alcoholes, los cuales según el autor son oxidados en sustratos metanogénicos como acetato, hidrógeno y CO₂.

Adekunle y Okolie., (2015) indicaron que la colaboración entre los microorganismos que llevan a cabo la oxidación con los microorganismos metanogénicos dependerá de la presión parcial de H₂. Esto es debido a que las reacciones de oxidación son posibles si la presión parcial de H₂ es baja. Por consiguiente, esto explicaría por que la colaboración con los metanógenos es muy importante, ya que continúan consumiendo el H₂ para producir metano, afirmaron los autores.

Por otro lado, Tenuta *et al.*, (2002) afirma que los AGV se identifican como Acético, Isobutírico, n-butírico, Caproico, Fórmico, Propiónico, Isovalérico, n-valérico y se clasifican en dos formas en solución disociada y no disociada; la cual está definida de acuerdo con la magnitud pKa que cuantifica la tendencia que tiene las moléculas a disociarse. A su vez, indicó que cuando el pH de una solución disminuye por debajo del pKa de cada ácido, la forma no disociada de los ácidos aumenta.

J. A Samaniego y P.A Sandoval., (2013) reportan que la formación de metano será determinada por el pH del medio y las formas no disociadas. Afirmando que los ácidos grasos volátiles son potencialmente tóxicos en sus dos formas. Sin embargo, a valores de pH de 3 o 4 los AGV se encontrarán de un 85% a 95% en formas no disociadas representando una mayor toxicidad. En ese sentido, Zhou *et al.*, (2011) a su vez indicó que conforme aumenta la concentración de AGV, el pH disminuye y la forma no disociada de los ácidos aumenta e inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas en el rumen.

Según M. T. V. Moreno., (2011) la disminución de pH provoca cambios en las condiciones ambientales, ya que no hay aprovechamiento del acetato e hidrógeno que son el sustrato de las bacterias metanogénicas para producir metano.

Shouvirik *et al* (2020) explicaron como la disminución del pH generada por la producción de AGV acidogénicos inhibe el metabolismo microbiano. Indicando que en efecto los

ácidos grasos no disociados se difunden en el citoplasma y se disocian en protones y aniones. En consecuencia, indicaron que los protones disminuyen el pH citosólico y los aniones aumentan la osmolaridad del citoplasma afectando la integridad de la membrana celular.

Por consiguiente, los AGV son considerados como productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, los cuales según Wang y Zhang., (2009) en el caso específico del ácido propiónico y butírico se reportan como los sustratos comúnmente convertidos a ácido acético, el cual es insumo para las bacterias metanogénicas.

En cuanto a las diferentes alternativas para controlar su acumulación, estudios recientes como los realizados por Jiang *et al.*, (2021) y H. Chunhuahe *et al.*, (2021) resaltan como el uso de carbón activado es una alternativa efectiva para solucionar este problema, debido a que tiene la capacidad de acelerar la producción de metano en términos de reducción de fase de retraso es decir con 10g/L de CA reportaron la producción de metano a los 10 días. En ese sentido, los autores concluyen que, los beneficios que genera el uso carbón activado en la digestión anaerobia, está asociado con favorecer el enriquecimiento en su superficie de microbiota metanogénica y fermentativa, lo cual mejora la degradación de los AGV y acortando el tiempo de producción de metano.

En ese sentido, en la reciente revisión realizada por L. Xiao, *et al.*, (2021) citó a diferentes autores que indicaron como el carbón activado (CA) al poseer una estructura porosa, se comporta como un adsorbente excelente de sustratos ricos en componentes tóxicos, y posee otras propiedades como ser amortiguador de pH lo cual favorece la DA. Así mismo citó, que el CA reemplaza la función del pelo y citocromo de la microbiota, promoviendo la eficiencia de la transferencia de electrones y como resultado acortar la fase lag o fase de adaptación, acelerando la producción de metano.

Según los reportes por M. T. V. Moreno *et al.*, 2011 el 70 por ciento del metano por DA se produce por la descarboxilación del ácido acético. Así mismo, existe una segunda ruta donde ocurre la reducción de CO₂ en presencia de H₂. En ambos casos se presentan grupos de microorganismos metanogénicos específicos denominados metanógenos acetoclásticas y metanógenos hidrogenotróficas capaces de transformar los sustratos acético, hidrógeno y CO₂ disponibles en el medio en metano.

En ese sentido, el uso de carbón activado estimula el crecimiento de comunidades microbianas sintróficas oxidantes de ácidos grasos volátiles y microorganismos hidrogenotróficos (Zhang et al., 2023). Además, el CA favorece la segunda vía de producción de metano, debido a que CA acorta la distancia para que H_2 llegue a los microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos, haciendo que el efecto del CA sea estimulante ya que favorece el crecimiento de las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas las cuales consumen H_2 en presencia de CO_2 para producir metano (Ryue et al., 2019).

Así mismo, cabe resaltar el estudio realizado por J. Davidraj *et al* 2020 en el cual logró evidenciar la influencia positiva de la degradación de los AGV y la formación de las biopelículas, con la adición de CA. El autor observó, que se favorece la relación sintrófica para la degradación de acetato y propionato, así como el crecimiento de los microorganismos.

1. Carbón Activado

El carbón activado (CA) es un material con un volumen de poro mayor a 0.2 ml g^{-1} y área superficial entre $670 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ y $2410 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ según Corredor., (2014). Así mismo, se reportan áreas superficiales del CA entre 800 a $1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ según Gómez, A., W., et al (2010) y Valencia, J.P., (2014).

Está conformado por átomos de carbonos enlazados formando láminas posicionadas en desorden con espacios como se puede observar en la Figura 1-1 Los cuales se encuentran entre 0.34 y 0.36 nm según Bansal *et al.*, (2005) Mcdougall, G.J., *et al* (1991). Se caracteriza fundamentalmente por su volumen de poros, estructura química y área superficial.

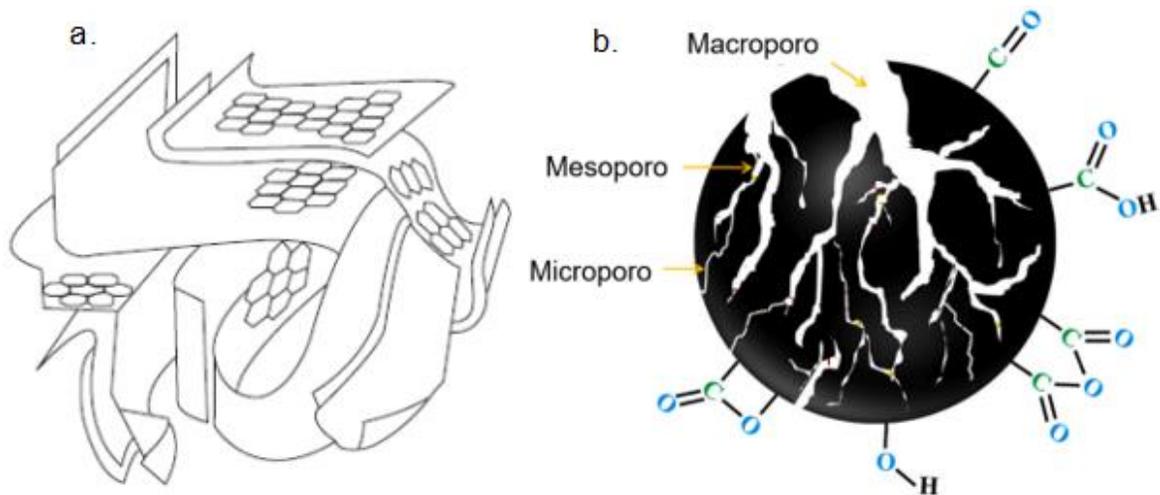


Figura 1-1 Estructura del carbón activado a. Posición de láminas y b. Estructura porosa y química. Nombre de la fuente: Imagen a. Garche., (2009) b. Sultana., et al (2022)

Como se puede ver en la Figura 1-1, la estructura y distribución del tamaño de poro de acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada el CA se clasifica como

macroporoso con diámetros mayores a 50nm (nanómetros), mesoporoso con diámetros entre 50 a 2 nm, y microporoso, con diámetros menores a 2nm. En el caso particular de los macroporos, actúan como conductos que transportan sustancias al interior ya que se conectan con los mesoporos y estos a su vez con los microporos de las partículas. Por otro lado, en los mesoporos se presenta un importante fenómeno denominado adsorción por condensación capilar el cual ocurre por efecto del llenado de estos mesoporos. Finalmente, con respecto a la microporosidad, también se reporta una clasificación como ultra microporoso cuando el CA tiene poros con diámetros menores a 0.7 nm. Sub microporoso con diámetros menores a 0,4 nm y Super microporoso para diámetros entre 0.7 y 2nm según lo citado por Gómez, A., W., (2010).

En este estudio, la estructura y distribución del tamaño de poro se determinó por la naturaleza del cuesco de palma como materia prima y el proceso de pirólisis utilizado para lograr su carbonización. Cabe resaltar que, el motivo por el cual se seleccionó el cuesco de palma como materia prima para la obtención de CA, es debido a que posee alta dureza y textura aportando rigidez al material, haciendo que mantenga un bajo índice de degradación durante su almacenamiento según lo citado por Rashidi., *et al* (2017)

Así mismo, contiene un alto contenido de lignina en su estructura vegetal, representando a la fracción principal del carbono fijo y en consecuencia permitirá obtener un mayor rendimiento en masa durante el proceso de activación según Garcia., *et al* (2010). Además, es generado en grandes cantidades y su utilización evita que se implementen procesos poco amigables con el medio ambiente en su disposición final como la quema para calderas o acumulación en rellenos sanitarios y fuentes hídricas según lo citado por Pitto, L. D., & Carvajal., (2017)

Una vez se seleccionó el cuesco de palma como materia prima, se sometió al proceso de carbonización con N₂ para obtener una fracción sólida carbonosa denominada biochar, el cual posee poros obstruidos por la presencia de alquitranes y material carbonoso que reducen su capacidad de adsorción. Por esta razón, el biochar se somete al proceso de activación con CO₂ como agente promotor de la liberación de la masa, permitiendo que se fijen heteroátomos los cuales constituyen los sitios activos e influyen directamente en la reactividad de su superficie (Córdoba. M.F., (2023)). De esta forma ocurre la modificación de la química superficial del material, debido a la presencia de heteroátomos enlazados a

los átomos de carbono, ya que pueden formar sitios que influyen en la adsorción de moléculas en fase gaseosa o líquida (Villanueva D.M., (2019)).

Otro aspecto interesante ocurre durante el proceso de activación del biochar, el cual se relaciona con la modificación química de su superficie. Una vez ocurre la activación el CA presenta grupos carbono oxígeno identificados como los que más influyen en sus propiedades de adsorción y suelen estar presentes en la superficie del CA. Estos grupos corresponden a carbonilo, hidroxilo, fenol, lactona, anhídrido, éter, quinona (Marsh., *et al* (2006), Menéndez D.J. y I. Gullón. M, y Corredor., (2014)).

Por lo tanto, en este estudio se utilizó CA producido en el grupo de investigación TAYEA a partir de cascajo de palma aplicando la metodología desarrollada por Córdoba., (2023) y carbón activado comercial como referencia tipo Norit. Con el objetivo de evaluar el impacto en el rendimiento de la producción de biogás, se desarrollaron tres objetivos específicos, inicialmente se produjo carbón activado a partir de cascajo de palma, posteriormente este fue adicionado a un proceso de digestión anaerobia, empleando celulosa como sustrato, y carbón activado comercial como patrón de referencia, determinando la dosis que mejora la producción de biogás. Finalmente, se utilizó la dosis encontrada en un último montaje con desechos de alimentos obtenidos de uno de los restaurantes de la Universidad Nacional.

1.1 Metodología

En esta sección, se describirá la metodología utilizada en la producción y activación del carbón activado a partir del biochar. Luego, se describirán las técnicas analíticas utilizadas para determinar las características fisicoquímicas de las muestras correspondientes al análisis próximo, último y termogravimétrico. Al finalizar esta sección, se explicará el procedimiento empleado para la caracterización de las propiedades superficiales (área superficial, volumen de poros y distribución del tamaño de poros). El cual fue referenciado por Córdoba (2023) como estrategia experimental.

- **Producción y activación del biochar**

El cuesco de palma se sometió a proceso de pirólisis en un horno horizontal rotatorio con flujo de nitrógeno de 100mLmin^{-1} hasta 550°C durante 1 hora a una tasa de calentamiento de $10^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$. El proceso de transformación del cuesco de palma mediante pirólisis se realizó tres veces tomando 1350 g de cuesco para obtener biochar.

En cuanto a la activación de biochar producidos en el paso anterior, se llevó a cabo en el horno horizontal a una temperatura de 850°C con flujo de CO_2 de 100mLmin^{-1} durante 6 horas de sostenimiento aproximadamente.

El carbonizado fue sometido a un proceso de evaluación para determinar el rendimiento de su activación. Luego, se analizaron los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del carbón activado obtenido a partir del cuesco de palma, carbón activado grado comercial y biochar como se mostrarán al final de la siguiente sección.

- **Caracterización fisicoquímica**

En este estudio la caracterización fisicoquímica se realizó mediante la identificación de los grupos funcionales del carbón activado producido y el biochar como línea base, mediante la técnica FT-IR. El análisis próximo y el análisis último (CHN) de carbón activado producido con biochar, comercial y biochar. A continuación, se describirán las pruebas de caracterización mencionadas anteriormente.

Se tomaron 0,118 g de muestras pulverizadas del carbón activado para realizar la respectiva identificación de los grupos funcionales en FT-IR. Posteriormente, cada muestra fue mezclada con bromuro de potasio (KBr) con un 2% de la muestra diluida como matriz no absorbente de la radiación. Esta mezcla en polvo obtenida se comprimió en una prensa troquel mecánica para formar una pastilla que fue expuesta al rayo de luz de un espectrómetro. Luego, se realizó la lectura de las muestras en el equipo Thermo Scientific Nicolet iS10 6700 FT-IR anexo a un módulo de transmitancia donde se generaron los espectros. En ese sentido, los valores obtenidos en los espectros fueron tomados en un rango de número de onda entre $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$. Luego, fueron relacionados con las frecuencias de vibración reportados en la literatura correspondientes a los grupos funcionales presentes en el carbón activado.

El análisis próximo permitió determinar el comportamiento de la temperatura durante la carbonización de las muestras y conocer la respectiva composición de humedad, ceniza, volátiles y carbono siguiendo los métodos estándar D3173, D3174, D3175 y D3172. En cada análisis se tomaron 19 mg de muestra de carbón activado producido y 19 mg de carbón activado comercial. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso térmico de calentamiento hasta una temperatura final de 999.85 °C bajo flujo de nitrógeno de 100mL min⁻¹ y a una velocidad de calentamiento de -272.15 °C min⁻¹, evaluándose la pérdida de masa.

Finalmente, en el análisis último las muestras de carbón activado producido por pirólisis, el carbón activado obtenido comercialmente y el biochar fueron procesadas de la misma forma como se describió en el paso anterior. En este análisis se logró determinar el contenido de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno. A su vez, se registró la presencia de ceniza, azufre y oxígeno.

- **Propiedades superficiales**

En este estudio se realizó un análisis de porosidad a las muestras de carbón activado (CA) comercial, biochar y el CA obtenido a partir del cuesco de palma. El cual consistió en seleccionar como los parámetros que permitieron evaluar la estructura porosa de las muestras, al área superficial, volumen de poros y distribución del tamaño de poro.

En términos generales, la metodología consistió en utilizar CO₂ y N₂ como adsorbatos para determinar el tamaño de poro y área superficial, midiendo el adsorbente N₂, el cual inyectándolo a -196 °C (temperatura de condensación) para analizar la región mesoporosa. Así mismo, se inyectó CO₂ por debajo de 0 °C hasta alcanzar el estado líquido, permitiendo ocupar las regiones micro porosas según el reporte técnico IUPAC.

Además, las estructuras porosas obtenidas en este estudio fueron caracterizadas mediante el análisis de las isothermas de adsorción obtenidas con N₂ a -196.15 °C, utilizando un analizador de área superficial y porosimetría marca Micromeritics TrisTar II Plus. Además, con el fin de liberar los poros de humedad, las muestras fueron previamente desgasificadas a una temperatura de 250 °C por un periodo de 24 horas.

Por lo tanto, a continuación, en la Tabla 1-1 se presenta los parámetros y metodologías utilizando el sortómetro BET.

Tabla 1-1 Metodología aplicada según las propiedades superficiales seleccionadas del CA con el sortómetro BET

Metodología	Propiedades superficiales
Brunauer-Emmett-Teller (BET)	Área superficial a partir de las isothermas de adsorción con nitrógeno
Dubinin- Radushkevish (D.R)	Área superficial: m^2g^{-1} Tamaño de poro: nm Volumen total de poros: cm^3g^{-1}
Teoría del Funcional de Densidad No Local (TFDNL)	Distribución de tamaño de poro

Según la Tabla 1-1 el área superficial (S_{BET}) se calculó a partir de las isothermas de adsorción de nitrógeno, empleando la metodología Brunauer – Emmett – Teller (BET), asumiendo un área seccional de 0.162 nm para la molécula de N_2 . El volumen total de poros fue calculado a partir de la cantidad de nitrógeno adsorbida a $p/p_0 = 0.99$, convertida a su volumen líquido. El área superficial y volumen de microporos fueron calculadas a partir del modelo de Dubinin Raduskevich. La distribución de tamaño de poros fue calculada mediante la teoría del funcional de densidad no local (NLDFT) y finalmente el diámetro medio se calculó con la relación $4000 \cdot V_t/A$ (bet) teniendo en cuenta que V_t es volumen total de poros y la letra A representa el área superficial.

1.2 Resultados y Discusiones

En esta sección, se presentarán los resultados obtenidos en la producción y activación del carbón activado. Luego, se describirán los grupos funcionales (FT-IR) identificados en el CA-BC y el BC como línea base. El análisis próximo y el análisis último (CHN) del carbón CA-BC, CA-com y BC. Al finalizar esta sección, se describirán los resultados obtenidos en cuanto al área superficial, volumen de poros y distribución del tamaño de poros.

• **Producción y activación del biochar**

Durante el proceso de transformación del cuesco de palma mediante pirólisis se obtuvo una cantidad aproximada de 450 g de biochar descritos en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2 Relación de los gramos de cuesco de palma transformados a biochar por pirólisis lenta.

Repetición \ Peso	W_{cuesco} de palma (g)	$W_{biochar}$ (g)
R1	450	150
R2	450	150
R3	450	150
Total	1350	450

NOTA: El proceso de transformación del cuesco de palma a biochar se realizó tres veces denominadas como R1, R2, R3 obteniendo para cada caso 150 gramos de biochar ($W_{biochar}$)

Por lo tanto, a partir de la activación de 450 g de biochar producidos en el paso anterior se obtuvo 216 g de carbonizado los cuales fueron caracterizados para determinar el rendimiento de su activación. En la Figura 1-2 se observan las muestras de carbón CA-com, CA-BC y BC. Estas fueron almacenadas en bolsas ziploc para realizar la respectiva caracterización del carbonizado.

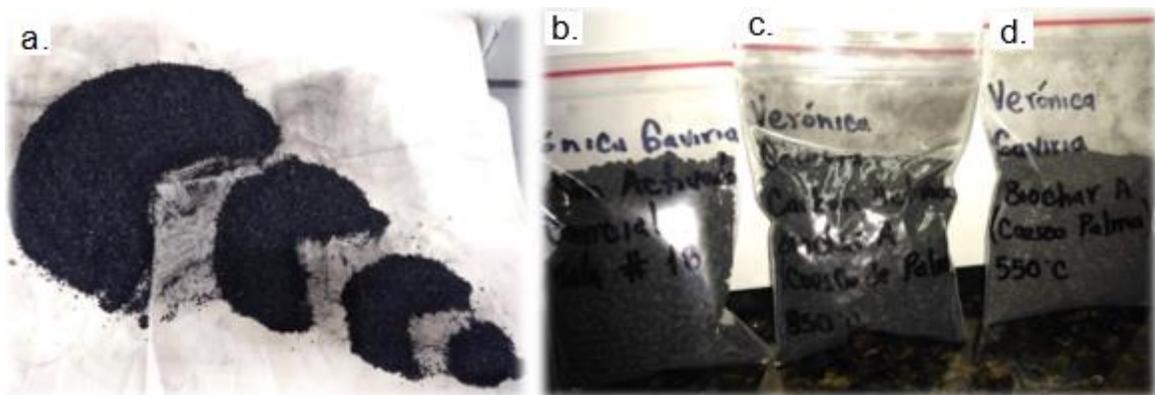


Figura 1-2 Carbonizado obtenido después de activar el biochar a. muestras almacenadas en bolsas ziploc de carbón activado comercial (CA-com) b., carbón activado de biochar (CA-BC) c. biochar (BC) d.

• **Caracterización fisicoquímica del carbón activado**

En cuanto a Identificación de los grupos funcionales (FT-IR) del carbón activado producido y biochar como línea base. Se pudo observar que el CA-BC en este estudio presentó bandas características similares al compararlas con los resultados obtenidos por Álvarez., (2019) el cual realizó pruebas de activación a 850°C del cusco carbonizado en una mezcla de 70% de vapor de H₂O y 30% de nitrógeno como se indica en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3 Grupos funcionales identificados por FT-IR en muestras de carbón activado identificadas por Álvarez., (2019) y Tello., (2018).

Bandas	Grupo funcional
3550 cm ⁻¹	OH Hidróxilo
2900 cm ⁻¹	C-H alifáticos (CH ₃)
2800 cm ⁻¹	C-H alifáticos (CH ₂)
1100 cm ⁻¹ - 1380 cm ⁻¹	C-OH grupos fenoles
1450 cm ⁻¹ a 1600 cm ⁻¹	C=C grupos aromáticos
1690 cm ⁻¹	C=O grupos cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y ésteres

Nombre de la fuente: Álvarez (2019). *Doctoral dissertation, Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.* Y Tello (2018) *Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.*

Con respecto a las bandas obtenidas en este estudio en la Figura 1-3 se presentan los grupos funcionales identificados en muestras de BC y CA-com.

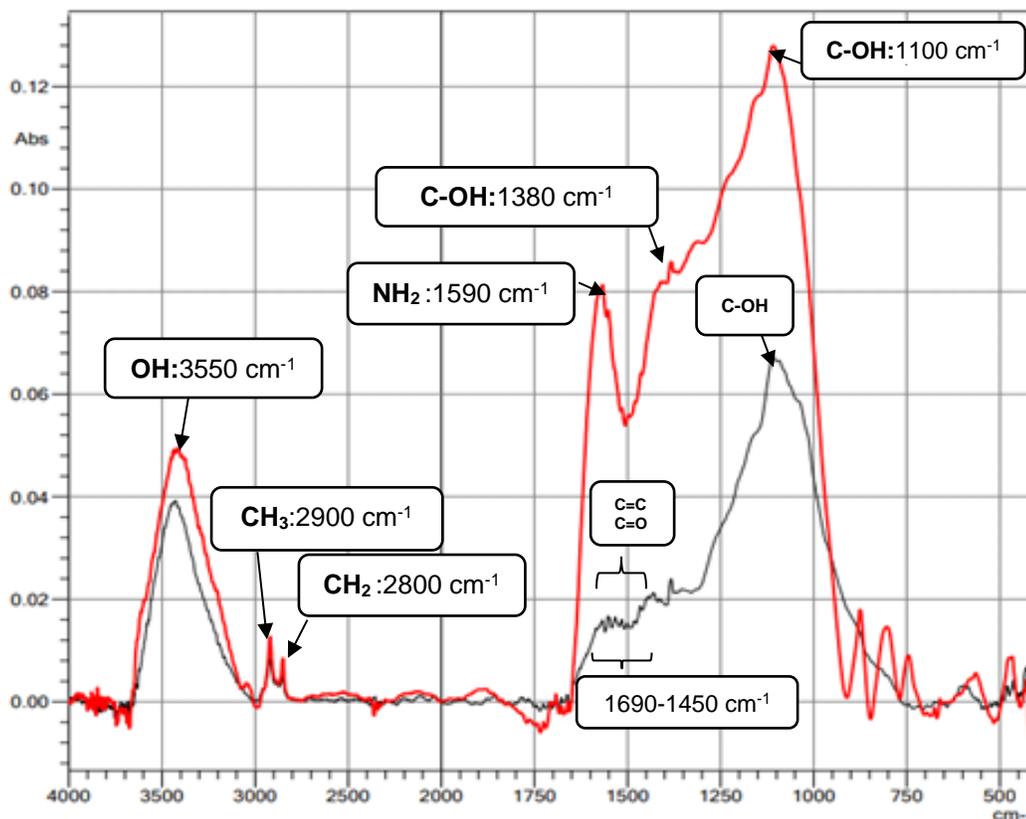


Figura 1-3 Medición de grupos funcionales (FTIR) de carbón activado producido con biochar (CA-BC) (línea negra), y biochar (BC) (línea roja).

Como se observa en la Figura 1-3 los espectros infrarrojos del BC presentó dos bandas de absorción características en 3550 cm^{-1} ; indicando la presencia de hidrógeno en moléculas de agua y grupos OH hidróxilo sobre su superficie. Y en la región 1100 cm^{-1} a 1380 cm^{-1} C-OH asociado a grupos fenoles.

Con respecto al CA cuesco de palma presentó un pico en la banda 3400 cm^{-1} relacionado a enlaces O-H. Los picos de 2900 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} correspondieron a enlaces C-H del grupo alifáticos tipo CH_3 y CH_2 . Además, en la región 1690 cm^{-1} - 1730 cm^{-1} Correspondió a Uniones dobles tipo C=O (cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y ésteres). Por lo tanto, se pudo evidenciar que en el BC la banda del grupo NH_2 fue eliminada. Además, se disminuyeron las bandas correspondientes a los grupos OH y C-OH debido a la pérdida de material generada durante el proceso de activación del biochar. Así mismo, dicho proceso dio lugar a la formación de nuevos grupos funcionales correspondientes uniones dobles de C=O similar a Álvarez., (2019), Tello., (2018) y Córdoba., (2023).

Los resultados correspondientes al análisis próximo de las muestras mediante el Análisis Termo Gravimétrico (TGA) se presentan en la Tabla 1-4

Tabla 1-4 Análisis próximo de las muestras y contenido material volátil y carbono correspondientes a CA-BC , CA-com y BC.

Descripción	Parámetro	Muestra CA de biochar (%)	Muestra CA Comercial (%)	Biochar cuesco de Palma (%)
Propiedad Física	Humedad	5.57	5.08	4.08
	Ceniza	5.91	3.23	5.02
Compuestos	Volátiles	2.05	9.76	6.71
	Carbono	86.46	81.94	74.19

La Tabla 1-4 Muestras de CA-BC fueron pulverizadas. En el caso del CA-com se secó en mufla a 110 °C por 2 horas, obteniendo los siguientes resultados donde se observó un alto contenido de carbono en las muestras de con CA-BC y en menor proporción se registró un valor de 74g de BC.

• **Análisis último (CHN) de CA-BC (A), CA- com (B) y BC (C)**

Como se puede observar en la siguiente Tabla 1-5 el carbón activado producido a partir de biochar presento un alto contenido de carbono en comparación a las muestras correspondientes al carbón activado comercial y el biochar procedente de cuesco de palma lo cual garantiza el buen desarrollo de sus característica estructurales y superficiales según Gonzales *et al*, 2017.

Tabla 1-5 Análisis último (CHN) de carbón activado producido con biochar, carbón activado comercial y biochar

Descripción	Parámetro	CA-BC (%)	CA-com (%)	BC (%)
Composición	Carbono	82.78	71.06	77.83
	Hidrógeno	0.95	2.05	2.31
	Nitrógeno	1.63	2.89	2.15

	Otros (%R)	14.64	24.00	17.7
--	------------	-------	-------	------

Nota: Se define como (%R) otros al contenido de ceniza, azufre y oxígeno

• **Propiedades superficiales del CA-BC y CA-com utilizando los adsorbentes N₂ y CO₂**

En cuanto a las propiedades superficiales se logró producir biochar activado con CO₂, obteniendo un área superficial equivalente de 811,637 m² g⁻¹ superior a la registrada para el CA-com de 554.686 m² g⁻¹ y el BC 471.641 m² g⁻¹. En ese sentido, en la Tabla 1-6 se describieron los resultados correspondientes a Propiedades superficiales del CA-BC y CA-com utilizando los adsorbentes N₂ y CO₂.

Tabla 1-6: Resultados obtenidos de las propiedades superficiales correspondientes al área superficial, volumen y distribución de tamaño de poro de las muestras calculadas con el sortómetro BET utilizando los adsorbentes N₂ y CO₂

Adsorbente	Muestra	Volumen total de poro (cm ³ /g)	Diámetro de poro promedio (nm)		Área superficial (m ² /g) BET
N ₂	CA-BC	0,300	2,1633	2,1694	555,48
N ₂	CA-com	0,863	2,3602	2,3638	1463,06
CO ₂	Área Superficial equivalente de CA-com: 554.68 (m ² /g) Área Superficial equivalente de CA-BC: 811,64 (m ² /g) Área Superficial equivalente de BC: 471,64 (m ² /g)				

En Tabla 1-6, según el método Dubinin- Radushkevish se obtuvo un área superficial con CO₂ de 811,64 (m² g⁻¹) CA-BC. Por lo tanto, al compararlo con el valor obtenido para BC este correspondió a 471.64 (m² g⁻¹).

En el caso del área superficial con N₂ fue de 555,48 (m² g⁻¹) para el CA-BC y 1463,06 (m² g⁻¹) para el CA-com. Por otro lado, el volumen de poro correspondió a 0,300418 cm³ g⁻¹ y el diámetro del tamaño de los poros fue de 2.16 nm para para CA-BC, lo cual indica que es un material mesoporoso.

Por lo tanto, el CA-BC presentó mayor capacidad de adsorción del CO₂ en este estudio al presentar un área superficial de 812 m²/g superior al BC Lo cual coincide con lo reportado por Córdoba., (2023) ya que la disminución de grupos funcionales OH (evidenciado en la Figura 1-3) aumentó la capacidad de adsorción del CO₂. por parte del CA; por la presencia

de enlaces covalentes en el CO_2 capaces de interactuar con la superficie del material facilitando el intercambio de electrones con los grupos C=O reflejando una mayor capacidad de adsorción.

Con respecto a la distribución de tamaño de poro en el CA-BC (A) con CO_2 y N_2 en la Figura 1-4 y Figura 1-6 se identificó qué tanto volumen de poro hay en un tamaño específico. Así mismo, al finalizar la sección se presentan los resultados del carbón activado comercial respectivamente.

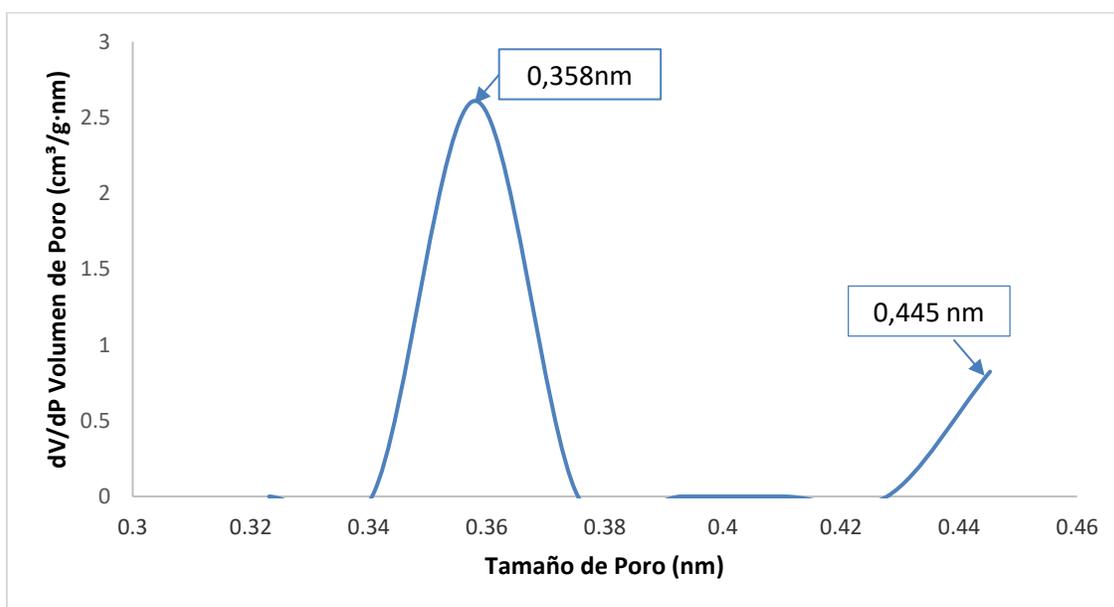


Figura 1-4 Distribución de tamaño de poro del CA-BC (A) utilizando CO_2 como adsorbato

En la Figura 1-4 se observa la formación de poros con tamaños de $0,358\text{nm}$ y $0,445\text{nm}$ con volúmenes de poro de 2.5 y $1\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}\text{ nm}^{-1}$.

Los datos obtenidos anteriormente, correspondientes al área superficial, volumen y distribución de tamaño de poro de las muestras calculadas con el sortómetro BET utilizando los adsorbentes N_2 y CO_2 , se complementaron analizando las isotermas de absorción, donde se obtuvo un comportamiento de absorción de los adsorbatos a las temperaturas de trabajo constante que correspondieron a $-196\text{ }^\circ\text{C}$ y 0°C para N_2 y CO_2 . En ese sentido, las isotermas tomaron formas específicas dependiendo la estructura del poro del material.

La Figura 1-5 muestra que el material correspondiente al biochar activado utilizando como adsorbato N_2 , presentó una isoterma de absorción tipo 2 y desorción tipo 4 indicando el retraso en la desorción del material. Lo cual representa, la combinación de mesoporos y submicroporos en el material.

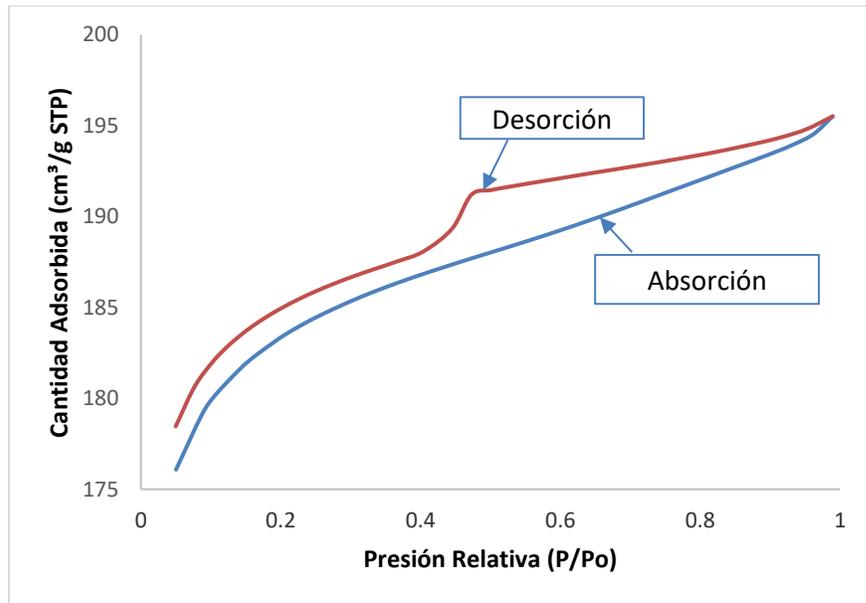


Figura 1-5 Distribución de tamaño de poro del carbón activado producido con biochar (A) utilizando N_2 como adsorbato. Nota: P/P_o : presión del adsorbato N_2 / presión total del sistema

Con respecto a la distribución de tamaño de poro del biochar activado con N_2 en la Figura 1-6 se pudo identificar los volúmenes de poros presentes según el tamaño específico.

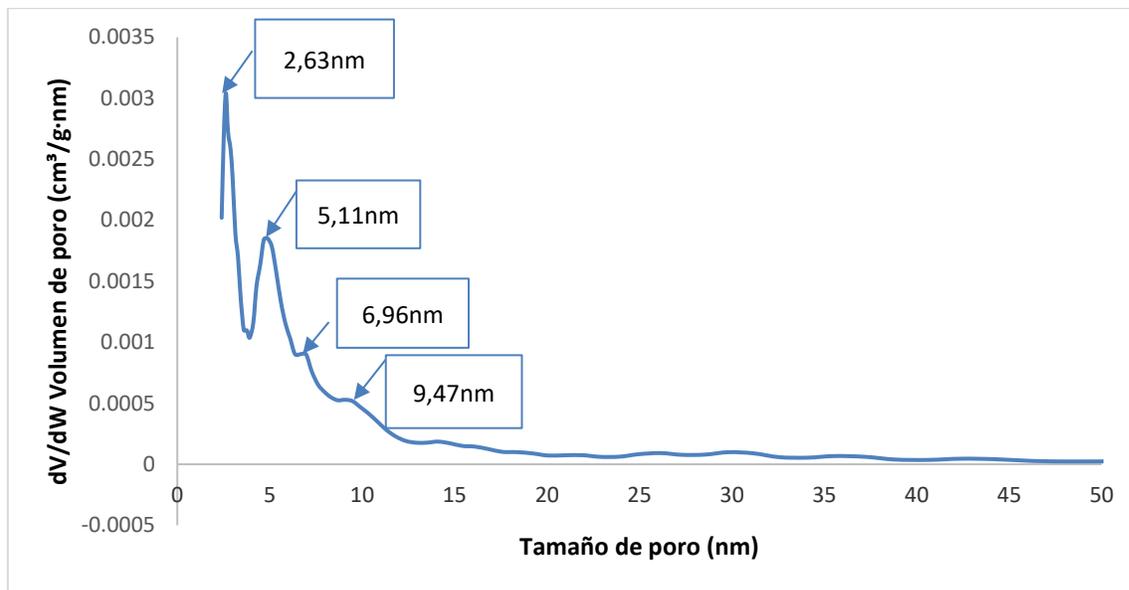


Figura 1-6 Tamaño de los poros y volumen de poros específicos CA-BC (A).

La Figura 1-6 mostró una curva de distribución de mesoporos con volúmenes de mayor proporción presentes en la estructura del CA-BC (A). Por lo tanto, el tamaño de poros identificados correspondió a 2.63nm, 5.11nm, 6.96 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{nm}^{-1}$. con volúmenes correspondientes a 0.003, 0.002, 0.001 y 0.0004 nm.

Al comparar los resultados obtenidos con el CA-com (B) se observó la presencia de sub microporos con volúmenes de menor tamaño con CO_2 y N_2 como se observa en la Figura 1-7

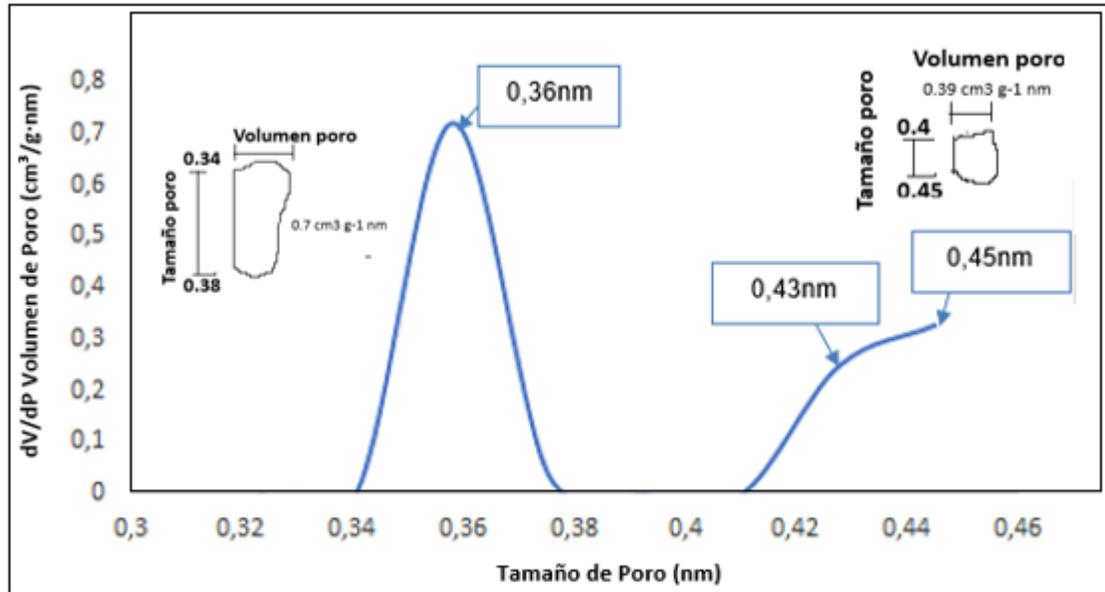


Figura 1-7 Distribución de tamaño de poro del carbón activado comercial (B) utilizando CO₂ como adsorbato.

Según la Figura 1-7 la curva de distribución de poros correspondiente a la muestra de CA-com muestra la presencia de microporos con tamaños de 0,36, 0,43 y 0,45 nm con volúmenes de tamaño de $0,7, 0,3$ y $0,35 \text{ cm}^3/\text{g}\cdot\text{nm}$. Resultados que fueron corroborados con las isotermas calculadas, lo cual hizo referencia a un material tipo 2 y tipo 4 que tiene combinación de mesoporos y sub-microporos como se presenta en la Figura 1-8.

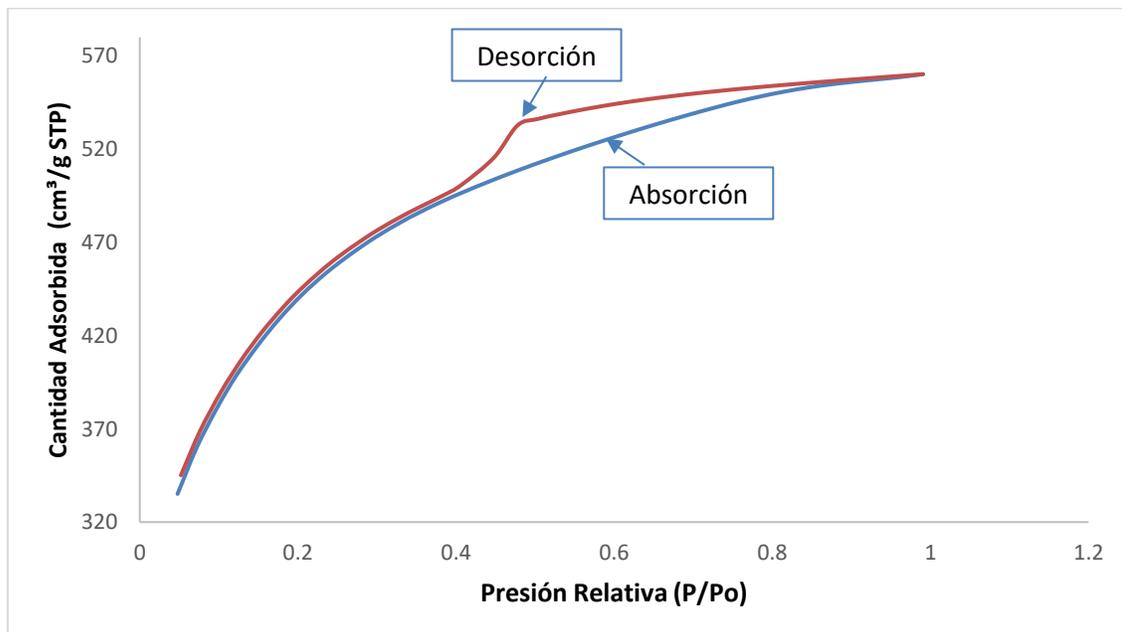


Figura 1-8 Distribución de tamaño de poro del carbón activado comercial (B) utilizando N₂ como adsorbato

La Figura 1-8 muestra que el material correspondiente al CA comercial utilizando como adsorbato N₂, presentó una isoterma de absorción tipo 3 y desorción tipo 4 indicando el retraso en la desorción del material. Por lo tanto, la isoterma hace referencia a un material que tiene combinación de mesoporos y sub microporos.

Con respecto a la distribución de tamaño de poro del carbón activado con N₂ en la Figura 1-9 se puede identificar los volúmenes de poros presentes según el tamaño específico.

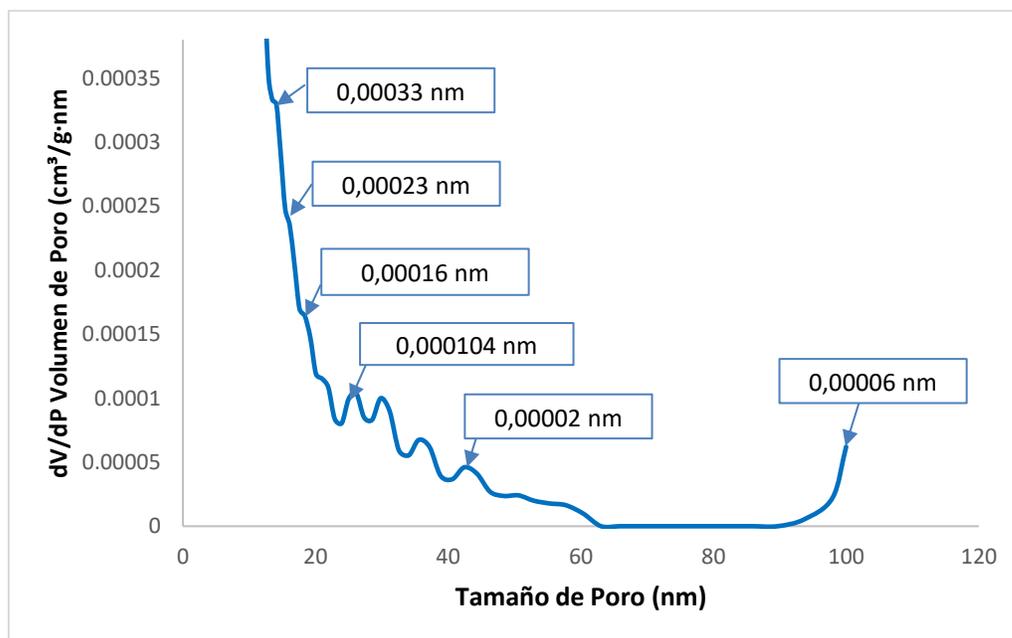


Figura 1-9 Tamaño de los poros y volumen de poros específicos del carbón activado comercial (B).

La Figura 1-9 mostró en la curva de distribución en la estructura del CA comercial (B), una mayor incidencia de poros de 14nm con volúmenes correspondientes a 0,00033 cm³ g⁻¹ nm⁻¹ . Consecutivamente se evidenció en segunda medida la presencia de poros de 16, 19 y 18 nm con volúmenes de 0.00023, 0.00016nm, 0,00014 cm³ g⁻¹ nm⁻¹. Finalmente, se obtuvo en menor proporción presencia de poros con 26 y 52nm con volúmenes de a 0,0001 y 0,00002 cm³ g⁻¹ nm⁻¹.

En este estudio, el mecanismo de activación implementado en el proceso de transformación del biochar activado permitió identificar el tipo de porosidad del material. En la prueba BET, se realizó la adsorción con CO_2 obteniendo un área superficial equivalente de $811,64 \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$ y N_2 de $555,48 \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$. Estos resultados confirman según la curva de distribución de N_2 presencia de mesoporos con tamaños de poro de 2.63, 5.11, 7 $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ nm}$ y volúmenes de poros 0.003, 0.002 y 0.001. A su vez, microporos con tamaños de poro entre 0.34 a 0.38 nm con volúmenes de poro de $2.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ nm}^{-1}$

Por lo tanto, comparando los resultados obtenidos con el carbón activado comercial presentó microporos con tamaños de 14, 16, 18, 20 y 26 nm con volúmenes de poros de 0.00033, 0.00023, 0.00016, 0,000104 y 0,00002 $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ nm}^{-1}$. Lo cual correspondió a la adsorción con CO_2 obteniendo un área superficial equivalente en este caso de $555,68 \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$ y N_2 de $1463.06 \text{ (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$.

1.3 Conclusiones parciales

El mecanismo de activación implementado en el proceso de transformación del biochar activado permitió determinar la presencia de mesoporos con tamaños de poro de 2.63, 5.11 y 7 nm y volúmenes de poros 0.003, 0.002 y 0.001 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$.

A su vez, presentó microporos con tamaños de poro entre 0.34 a 0.38 nm con volúmenes de poro de 2.5 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{nm}^{-1}$. Por lo tanto, comparando los resultados obtenidos con el carbón activado comercial presentó microporos con tamaños de 14, 16, 18, 20 y 26 nm con volúmenes de poros de 0.00033, 0.00023, 0.00016, 0.000104 y 0.00002 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{nm}^{-1}$.

El tamaño de los poros obtenidos dependió directamente de la naturaleza del agente de activación utilizado y las condiciones de activación implementadas. En este caso, en el proceso de carbonización del material precursor permitió el rompimiento de enlaces y formación de sólidos carbonosos.

Las estructuras mesoporosas del CA de cuesco de palma favorecieron los procesos de adsorción y su interacción entre los grupos funcionales de la superficie del carbón activado y los grupos específicos de los microorganismos. Estas interacciones podrían aumentar la afinidad de las moléculas por el material poroso, y por lo tanto mejorar la capacidad de adsorción.

2 Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM)

El potencial bioquímico metanogénico es expresado como el volumen de metano seco de gas bajo condiciones estándar (273.15 K y 101.33 kPa) por masa de sólidos volátiles adicionado. Es definido como una prueba a escala de laboratorio implementada para determinar la capacidad de producción de metano, evaluar la biodegradabilidad anaerobia de un sustrato orgánico mediante la selección de un sustrato e inóculo potencial. De esta forma, con el potencial bioquímico metanogénico se obtienen valiosos datos experimentales que ayudan al investigador a predecir el funcionamiento de los digestores. Angelidaki et al., (2016). Por lo tanto, en este estudio los datos obtenidos fueron de gran valor para empezar a entender el efecto del carbón activado ya que sirvieron como hoja de ruta para los modelos cinéticos que permiten analizar el proceso de digestión anaerobia y predecir su funcionamiento de los biodigestores a escala real.

En términos generales según el grupo especializado en digestión anaerobia constituido por Angelidaki *et al.*, (2009), indicaron que existen una serie de factores que constituyen el ensayo de PBM tales como el sustrato, inóculo, condiciones experimentales y operacionales descritos a continuación. El sustrato se define como la cantidad de alimento adecuada para ser digerido por los microorganismos, para su recolección, se utiliza la norma alemana VDI 4636 la cual cita la importancia de caracterizar el sustrato en términos de sólidos volátiles y sólidos totales. En este estudio particularmente, se utilizó celulosa como sustrato sintético para definir la dosis adecuada CA, una vez identificada, se realizó en una nueva prueba de PBM para evaluar la capacidad de biodegradabilidad de los residuos orgánicos obtenidos de la Universidad Nacional de Colombia en presencia de microorganismos contenidos en muestras de lodo de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales.

El inóculo hace referencia a la muestra de microorganismos o biomasa utilizada para iniciar el proceso de digestión anaerobia. Al momento de determinar su concentración según, entre 1.5 g SV L⁻¹ (en procesos sin agitación) y entre 2 a 5 g SV L⁻¹(con agitación). Así mismo, la concentración del inóculo debe ser alta en comparación con la del sustrato (en términos de sólidos volátiles). En este estudio, se utilizó lodo fresco procedente de un reactor anaeróbico, caracterizado previamente en términos de sólidos volátiles siguiendo la norma VDI 4630.

Las condiciones experimentales son los métodos de cuantificación, los cuales son los métodos volumétricos, manométrico y cromatografía como los más reportados en los ensayos de PBM para medir el biogás. En este estudio se utilizaron el método manométrico, utilizando un manómetro para medir la presión del biogás antes de capturar el CO₂. Posteriormente, se utilizó el método volumétrico en el cual el biogás es puesto en contacto con una solución alcalina para capturar CO₂ y obtener el volumen de metano en términos de NaOH desplazado (Casallas., *et al* 2021).

Finalmente, las condiciones operacionales en este estudio fueron definidas como la capacidad del reactor, tiempo de los ensayos, condiciones anaerobias y relación sustrato inóculo. En cuanto a la capacidad del reactor, correspondió a reactores ambar de 1.1L. El tiempo de los ensayos, el cual se determinó, una vez se terminó la producción diaria de metano durante 3 días consecutivos es decir su valor era inferior al 1% del volumen acumulado de metano.

Con respecto a las condiciones anaerobias y la relación sustrato inóculo. En ese sentido se utilizaron tapones de caucho para mantener el sistema bajo condiciones anaerobias, y se mantuvo una proporción de sólidos volátiles del inóculo mayor, a los sólidos volátiles del sustrato para minimizar problemas de acidificación o inhibición.

Cabe resaltar que para la validación de los resultados de las pruebas de PBM se utilizó un control positivo, permitiendo validar la actividad del inóculo con un sustrato estándar. En este estudio se utilizó la celulosa ya que es un polímero que implica todos los pasos importantes de la degradación de la digestión anaerobia. Así mismo, es un sustrato de fácil manejo, almacenamiento y bajo costo según lo reporta Angelidaki., (2009)

2.1 Metodología

Se implementó el protocolo del Potencial Bioquímico Metanogénico conocido por sus siglas PBM cuyo valor fue calculado experimentalmente utilizando inicialmente celulosa (sustrato seco) y lodo floculento activo (inóculo) a través del método manométrico y volumétrico con las ecuaciones descritas a continuación citada por Cleves *et al.*, (2016). Finalmente, se repitió el ensayo de PBM utilizando residuos orgánicos como sustrato en frascos ambar de 1.1L en todos los casos. En términos generales el PBM se define de acuerdo con la ecuación (1).

(1)

$$PBM = \frac{V_{TCH_4} CE}{SV}$$

Donde $V_{TCH_4} CE$ es el volumen total de metano (L) a condiciones estándar de Presión (1 atm) y temperatura (273 K). SV corresponde a los sólidos volátiles iniciales del sustrato (g SV), por lo tanto, $V_{TCH_4} CE$ fue calculado con la siguiente ecuación (2).

(2)

$$V_{TCH_4} CE = V_{CH_4} CE + V_{CH_4} \text{ disuelto } CE - V_{CH_4} \text{ control}$$

Donde $V_{TCH_4} CE$ es el volumen total de metano en condiciones estándar (L). $V_{CH_4} CE$ es volumen de metano en condiciones estándar (L). $V_{CH_4} \text{ disuelto } CE$ corresponde al volumen de metano disuelto (L). $V_{CH_4} \text{ control}$ es volumen de metano producido por el inóculo sin sustrato (L). En ese sentido, $V_{CH_4} CE$ fue calculado con la ecuación (3) y n_{CH_4} correspondiente a la ecuación (4).

(3)

$$V_{CH_4} CE = \frac{n_{CH_4} * R * Te CE}{P CE}$$

(4)

$$n_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}(L) * \rho_{CH_4} \left(\frac{g}{mL}\right) * 1000}{P M_{CH_4} \left(\frac{g}{mol}\right)}$$

Donde $V_{CH_4} CE$ es el volumen de metano en condiciones estándar (L). n_{CH_4} : son las moles de metano (mol). R : constante de los gases ideales ($0,082 \text{ atmLK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$). $Te CE$: Temperatura a condiciones estándar (273,15 K). $P CE$: Presión a condiciones estándar (1 atm).

Para el cálculo de las moles de metano se emplea la ecuación 4, donde $V_{CH_4}(L)$ es volumen de metano medido experimentalmente. $\rho_{CH_4} \text{ g mL}^{-1}$: Densidad del metano ($0.000717 \text{ g mL}^{-1}$). $PM_{CH_4} \text{ g mol}^{-1}$: Peso molecular del metano ($16,04 \text{ g mol}^{-1}$). Posteriormente, se calculó el segundo término $V_{CH_4} \text{ disuelto}$ bajo condiciones estándar (CE) con la ecuación (5) y $n_{CH_4} \text{ disuelto}$ con la ecuación (6).

(5)

$$V_{CH_4} CE = \frac{n_{CH_4} \text{ disuelto} * R * T_e}{\Delta P}$$

Donde, T_e : Temperatura del experimento (K) (se consideró la estándar). ΔP incremento de la presión (atm) (se consideró la estándar) y n_{CH_4} disuelto son las moles de metano disuelto(mol) que fueron calculadas con la ecuación (6).

(6)

$$n_{CH_4} \text{ disuelto} = M_{CH_4} \text{ disuelto} * V_U$$

Donde V_U es el Volumen útil del reactor (600mL) calculado con la ecuación (7) igual a Vol_{agua} (350mL) y $Vol_{inoculo}$ (250mL).

(7)

$$V_U = Vol_{agua} + Vol_{inoculo}$$

Y, M_{CH_4} disuelto es la concentración molar de metano disuelto ($molL^{-1}$), de acuerdo con la ecuación (8).

(8)

$$M_{CH_4} \text{ disuelto} CE = \frac{M_{H_2O} * X_{CH_4} \text{ disuelto}}{1 - X_{CH_4} \text{ disuelto}}$$

Donde, M_{H_2O} : Concentración molar del agua ($molL^{-1}$). X_{CH_4} disuelto: Fracción molar de metano disuelto ($molL^{-1}$), definido en la ecuación (9).

(9)

$$X_{CH_4} \text{ disuelto} = \frac{\Delta P}{H_{CH_4}}$$

Donde, ΔP : Incremento de la presión (atm) y H_{CH_4} : Constante de Henry para el CH_4 (atm) calculada con la ecuación (10).

(10)

$$H_{CH_4} = 10 \left[\frac{-673,74}{T_e} + 6,88 \right]$$

Donde, T_e : Temperatura del experimento (K)

Con base en las medidas de producción de metanos durante cada experimento, se graficó la producción de biogás acumulado por gramo de sólidos volátiles del inóculo (L Biogás/g SV adicionado) en función del tiempo:

$$PBM = \frac{L\text{Biogás}}{gSV\text{adicionado inicialmente}}$$

Es importante aclarar que los resultados obtenidos del PBM se presentarán, debidamente después de describir los tratamientos y cálculos correspondientes a gramos de Sólidos Volátiles (g SV) tanto del sustrato como el correspondiente al inóculo descritos a continuación.

2.1.1 Descripción de los ensayos experimentales.

En este trabajo se realizaron cuatro montajes experimentales en los cuales fue utilizado el mismo mecanismo para la medición del potencial bioquímico metanogénico (PBM). En ese sentido, inicialmente se establecieron los factores del ensayo PBM como son la cantidad de sustrato, inóculo, condiciones experimentales y operacionales los cuales serán descritos a continuación en la siguiente Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Resumen de las condiciones experimentales evaluadas en este estudio

Experimento	Sustrato	Tipo y Dosis de CA	Referencias
1	Celulosa	10 g/L, 15 g/L y 20 g/L CA-com	(Fanghua., et al 2012), J.Davidraj et al., (2020) y (C.G Tojo et al., 2018)
2	Celulosa	25 g/L, 30 g/L y 35 g/L CA-com	(Sajib.B and Bipro.D., 2017)
3	Celulosa	10 g/L, 15 g/L, 20 g/L y 25 g/L CA-	(Suyun X.,et al 2018)
4	Residuos orgánicos de alimentos	25 g/L CA-com 25 g/L CA-BC	Este estudio

En el primer montaje se utilizaron tres concentraciones de carbón activado grado comercial (Fanghua., *et al* 2012), J.Davidraj *et al.*, (2020) y (C.G Tojo *et al.*, 2018) de 10 g/L, 15 g/L y 20 g/L (denominado Montaje 1) y en el segundo montaje se evaluó concentraciones de carbón activado grado comercial (Sajib.B and Bipro.D., 2017) de 25 g/L, 30 g/L y 35 g/L; luego, se realizó un tercer montaje, donde se evaluaron concentraciones (Suyun X.,*et al* 2018) de 10 g/L, 15 g/L, 20 g/L y 25 g/L, en este caso utilizando carbón activado producido en el laboratorio con el biochar de cuesco de palma (denominado Montaje 3). En los tres casos experimentales se utilizó celulosa grado comercial como sustrato estándar para

validar la actividad del inóculo, el cual correspondió a lodo anaerobio fresco procedente de una Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR). Además, al trabajar con un sustrato sintético contribuyó a tener la posibilidad de reconocer el efecto de la adición de carbón activado al entrar en contacto con el inóculo sin tener preocupación por inhibición de compuestos que podrían presentarse con sustratos orgánicos.

Finalmente, se realizó un cuarto montaje con residuos orgánicos de alimentos procedentes del restaurante de la Universidad Nacional como sustrato y el mismo inóculo, empleando la concentración de carbón activado que más favoreció la producción de PBM. Por lo tanto, en el cuarto montaje se evaluó el efecto por separado del CA obtenido de cuesco de palma y el CA grado comercial (denominado Montaje 4).

• Montaje 1

Para determinar la cantidad de sustrato e inóculo a emplear en el ensayo, fue necesario conocer la concentración de SV y ST del inóculo, las cuales fueron determinadas siguiendo la norma técnica colombiana NTC 897, empleando la ecuación (11) y ecuación (12) descritas a continuación: Por lo tanto, los valores de Sólidos Volátiles y Sólidos Totales del inóculo promedio correspondieron a 29,27 g L⁻¹ y 14,605 g L⁻¹ con desviación estándar de 0.277 ST y 0.601 SV respectivamente.

(11)

$$ST = \left[\frac{W2 - W1}{Vol m} \right]$$

ST: Sólidos totales obtenidos a 105°C (g/L)

W2: Peso de la muestra después de calentar a 105°C (g)

W1: Peso del crisol vacío (g)

W1 m: Volúmen de la muestra (0.02 L).

(12)

$$SV = \left[\frac{W3 - W1}{Vol m} \right]$$

SV: Sólidos volátiles obtenidos a 550°C (g/L)

W3: Peso de la muestra incinerada después de calentar a 550°C (g).

W1: Peso del crisol vacío (g).

Vol m: volumen inicial de la muestra (0.02 L)

Consecutivamente, en este montaje se definió un volumen de trabajo 600 mL, conservando un espacio libre de 500 mL como se observa en la Figura 2-1. A su vez, se fijó un volumen de inóculo de 250 mL para determinar la masa de inóculo que se debía emplear. De esta forma, los valores correspondientes a volumen del inóculo, sólidos totales y volátiles fueron reemplazados en la ecuación (13) para calcular los gramos de SV de Inóculo.

(13)

$$g \text{ SV inoculo} = [250 \text{ (ml) inóculo}] * \left[0,0146 \left(\frac{g}{ml}\right) \text{SV inóculo}\right]$$

$$g \text{ SV inoculo} = 3,6$$

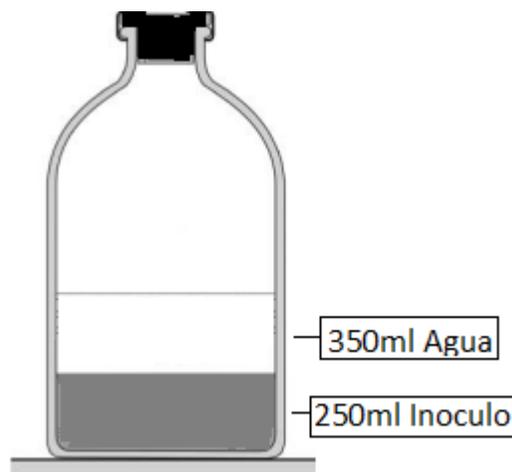


Figura 2-1 Volumen del recipiente utilizado para la prueba de biodegradabilidad anaeróbica. Frasco ámbar de 1100 mL. Nombre de la fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se utilizó la ecuación (14) que relaciona la proporción inóculo/sustrato (RIS) para despejar el valor de SV del sustrato (g), y se reemplazó el valor de *SV del inóculo* en esta ecuación RIS. En este sentido se consideró un RIS equivalente a 2 siguiendo las recomendaciones de Angelidaki *et al.*, (2016) debido a que la proporción

de *SV del inóculo* requiere ser mayor a los SV del sustrato con el fin de minimizar los problemas de acidificación o inhibición.

(14)

$$RIS = \left[\frac{SV \text{ inóculo } (g)}{SV \text{ sustrato } (g)} \right]$$

$$SV \text{ sustrato } (g) = \left[\frac{SV \text{ inóculo } (g)}{RIS} \right]$$

$$SV \text{ sustrato } (g) = \left[\frac{3,6 \text{ g } SV \text{ inóculo}}{2} \right]$$

$$g \text{ SV de Sustrato} = 1,8$$

Los valores calculados anteriormente correspondientes a gramos de sólidos volátiles (g SV) de Sustrato (1,8) y g SV de inóculo (3,6) permitieron el diseño del montaje para todos los tratamientos con diferentes concentraciones de carbón activado como se presenta en la siguiente Tabla 2-2

Tabla 2-2 Parámetros experimentales del Potencial bioquímico Metanogénico.

Muestra	Descripción	pH inóculo	Muestra	Descripción	pH inóculo
A1	Agua:350ml Inóculo: 3,6 g SV	7,369	CA10	Agua:350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA:10g	7,464
A2	Agua:350ml Inóculo: 3,6 g SV	7,387	CA15	Agua: 350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA: 15g	7,331
C1	Agua:350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV	7,372	CA15	Agua: 350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA: 15g	7,352
C2	Agua:350ml Celulosa:1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV	7,41	CA20	Agua: 350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA: 20g	7,352
CA10	Agua:350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA:10g	7,352	CA20	Agua: 350ml Celulosa: 1,8 g SV Inóculo: 3,6 g SV CA: 20g	7,352

NOTA: Tratamiento A1 (inóculo y agua), C1 (inóculo y celulosa), CA10-com (inóculo, celulosa y 10g/L de Carbón Activado (CA) comercial (com)), CA15-com (inóculo, celulosa y 15g/L), y CA20-com (inóculo, celulosa y 20g/L).

En este estudio, cada frasco fue sellado de acuerdo con lo descrito por J.M Sánchez., (2019), usando un tapón de caucho para mantener las condiciones anaerobias durante el proceso de biodigestión. En la medición del biogás se empleó el método volumétrico (ver figura Figura 2-2) como una medida indirecta del biogás producido; el cual consistió en conectar el reactor a una frasco invertido que contiene como solución barrera NaOH al 2% (pH mayor o igual a 12). De esta forma, se absorbió el CO₂ contenido en el biogás.

Adicionalmente, se adaptó al sistema una aguja hipodérmica que atravesó el tapón de caucho para permitir la salida del NaOH desplazado por el biogás entrante. Finalmente, a través de la aguja hipodérmica el volumen de metano equivalente se desplazó hasta un cilindro graduado donde fue medido.

A su vez el tapón de caucho fue atravesado por una tubería de acero inoxidable donde se adaptó una manguera plástica, la cual permitió conectar una válvula de tres pasos a un manómetro que permitió registrar la respectiva presión en centímetros de agua (cm H₂O) en todos los reactores.

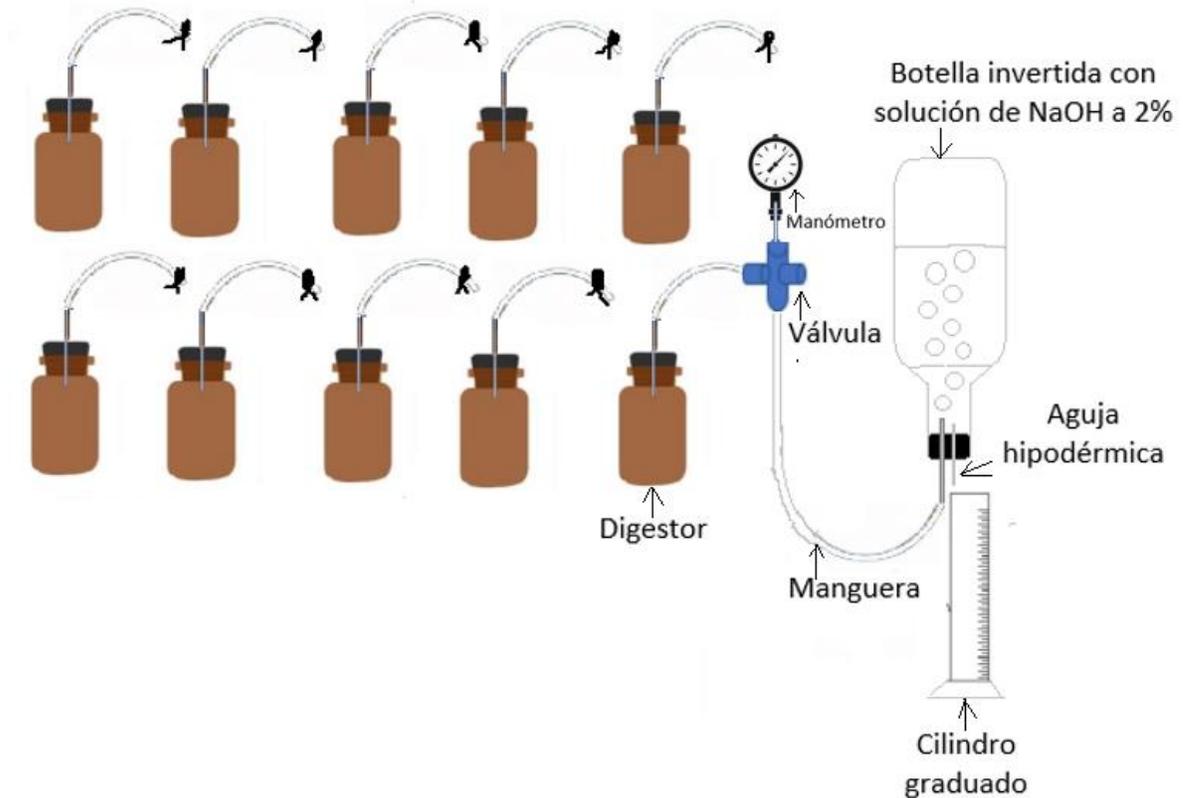


Figura 2-2 Montaje experimental para determinar el volumen de biogás producido a concentraciones de 10, 15 y 20 g/L. Fuente: Elaboración propia

• Montaje 2

Con respecto al segundo montaje, se evaluaron tres concentraciones de carbón activado grado comercial de 25 g/L, 30 g/L y 35 g/L utilizando celulosa grado comercial (1.8 g) como sustrato estándar y lodo fresco procedente de reactor anaeróbico activo de una Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR). En ese sentido, siguiendo el montaje descrito anteriormente se utilizó el mismo tipo de reactores y método volumétrico descrito en las Figura 2-2.

Inicialmente, se determinó la concentración de sólidos totales y volátiles promedio del inóculo utilizando las ecuaciones (11) y (12) correspondiente a ST inóculo $28,864 \text{ g L}^{-1}$ y SV inóculo $13,499 \text{ g L}^{-1}$ con desviación estándar de 1.645 ST y 0.697 SV. Así mismo, relacionando el volumen de inóculo con el valor promedio de SV del inóculo ($0,0135 \text{ mL}^{-1}$), se determinaron los gramos de SV Inóculo siguiendo la ecuación (11), obteniendo un valor 3,375 g SV del inóculo. Finalmente, se utilizó la ecuación (12) y que relaciona la

proporción sustrato/inóculo (RIS) para despejar el valor correspondiente a los gramos de SV para el sustrato y se reemplazó el valor de SV del inóculo en la ecuación (14) correspondiente a RIS obteniendo un valor de 1,7 g SV de Sustrato.

En cuanto a las condiciones experimentales, los valores calculados correspondientes a gramos de sólidos volátiles (g SV) de Sustrato (1,7) y g SV de inóculo (3,7) permitieron el diseño del montaje para todos los tratamientos realizados por triplicado con diferentes concentraciones de carbón activado como se presenta en la siguiente Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Descripción de parámetros experimentales del montaje de Potencial bioquímico Metanogénico con 25 g,30 g,35g de carbón activado comercial.

Muestra	Descripción	pH inóculo	Muestra	Descripción	pH inóculo
A1	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,369	CA25	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml CA: 25 g	7,173
A2	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,387	CA25	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7g Inóculo: 250 ml CA: 25 g	7,191
A3	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,387	CA25	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo:250 ml CA: 25 g	7,162
C1	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml	7,188	CA30	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml CA: 30 g	7,199
C2	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml	7,199	CA30	Agua: 350ml Celulosa: 1,7g Inóculo: 250 ml CA: 30 g	7,172
C3	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml	7,197	CA30	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml CA: 30 g	7,190
CA35	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml CA: 35 g	7,146	CA35	Agua: 350 ml Celulosa: 1,7 g Inóculo: 250 ml CA: 35g	7,147
CA35	Agua: 350 ml Celulosa:1,8 g Inóculo: 250 ml CA: 35 g	7,142			

NOTA: Descripción de las condiciones experimentales del Potencial bioquímico Metanogénico acumulado utilizado para los tratamientos A2 (inóculo y agua), C2 (inóculo y celulosa), CA25-com (inóculo, celulosa y 25g/L de Carbón Activado (CA) comercial (com)), CA30-com (inóculo, celulosa y 30g/L de CA-com), CA35-com (inóculo, celulosa y 35g/L CA-com).

• Montaje 3

Se evaluaron tres concentraciones de CA obtenido de cuesco de palma 10 g/L, 15 g/L, 20 g/L y 25 g/L utilizando celulosa grado comercial como sustrato estándar y lodo fresco procedente de reactor anaeróbico activo de una Planta de Tratamiento de Aguas residuales (PTAR).

En principio, se siguió el montaje anterior correspondiente a Figura 2-2, empleando las ecuaciones (11) y (12) para calcular los valores correspondientes a 2,80 g L⁻¹ ST y 0,76 g L⁻¹ SV del inóculo promedio con desviación estándar de 0,199 ST y 0,040 SV. A su vez, se utilizó la ecuación (13) para determinar 0,19 g SV de inóculo. Finalmente, se utilizó la ecuación (14) que relaciona la proporción sustrato/inóculo (RIS) para despejar el valor de SV Sustrato (g), obteniendo un valor de 0,095 g SV de Sustrato.

En cuanto a las condiciones experimentales los valores calculados correspondientes a gramos de solidos volátiles (g SV) de Sustrato (0,095) y g SV de inóculo (0,19) permitieron el diseño del montaje para todos los tratamientos realizados por triplicado con diferentes concentraciones de carbón activado como se presenta en la siguiente Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Descripción del montaje de Potencial bioquímico Metanogénico junto de carbón activado de cuesco de palma.

Muestra	Descripción	pH inóculo	Muestra	Descripción	pH inóculo
A1	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,224	10 CAC1	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA:10 g	7,173
A2	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,224	10 CAC2	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 10 g	7,191
A3	Agua: 350 ml Inóculo: 250 ml	7,224	10 CAC3	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g	7,162

				Inóculo: 250 ml CA: 10 g	
C1	Agua:350 ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml	7,188	15 CA- BC1	Agua: 350 ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 15 g	7,130
C2	Agua: 350 ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml	7,188	15 CA- BC2	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250ml CA: 15 g	7,130
C3	Agua: 350 ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml	7,188	15 CA- BC3	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 15 g	7,130
20 CA- BC1	Agua: 350ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 20g	7,133	25 CA- BC1	Agua: 350ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 25 g	7,121
20 CA- BC2	Agua: 350ml Celulosa: 0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 20 g	7,133	25 CA- BC2	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 25 g	7,121
20 CA- BC3	Agua: 350 ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250ml CA: 20 g	7,121	25 CA- BC3	Agua: 350ml Celulosa:0,095 g Inóculo: 250 ml CA: 25 g	7,121

NOTA: Descripción de las condiciones experimentales del Potencial bioquímico Metanogénico acumulado utilizado para los tratamientos A3 (inóculo y agua), C3 (inóculo y celulosa), CA10-BC (inóculo, celulosa y 10g/L de Carbón Activado (CA) de biochar (BC)), CA15-BC (inóculo, celulosa y 15g/L), CA20-BC (inóculo, celulosa y 20g/L) y CA25-BC (inóculo, celulosa y 25g/L).

• Montaje 4

En el cuarto montaje, se utilizó la cantidad adecuada de 25 g carbón activado comercial, lo cual se presentará posteriormente y con ella se evaluó por triplicado la producción de PBM con residuos orgánicos de alimentos y lodo procedente de un reactor anaeróbico activo de la PTAR. En simultaneo se evaluó también por triplicado la generación de biogás con 25 g carbón activado de cuesco de palma, residuos orgánicos de alimentos y lodo fresco de PTAR.

En cuanto a la cantidad de inóculo y sustrato se utilizó 550 ml de inóculo, 25 ml de residuos orgánicos contenidos en frascos ambar de 1.1 L. Tal como se describe en la Figura 2-3 el

volumen de trabajo fue de 575ml y se conservó un espacio libre aproximadamente de 525 ml.

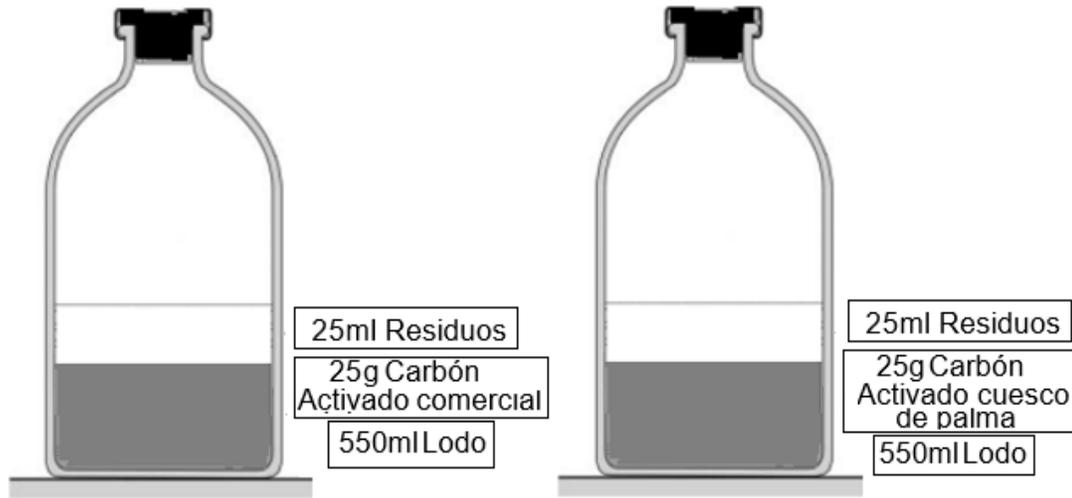


Figura 2-3 Volúmenes utilizados para la prueba de biodegradabilidad anaeróbica de los desechos orgánicos de alimentos con CA- com y CA-BC. Nombre de la fuente: Elaboración propia

En términos generales, se utilizó el mismo tipo de reactores y método volumétrico descrito en la Figura 2-2. Inicialmente, se realizó la caracterización de los residuos orgánicos de alimentos para sólidos totales y sólidos volátiles promedio utilizando las ecuaciones (11) y (12) obteniendo un valor de 123,888 g L⁻¹ ST y 7,647 g L⁻¹ SV de residuos orgánicos de alimentos con desviación estándar de 5.886 ST y 0.644 SV.

Del mismo modo, se determinaron los sólidos totales (ST) y Sólidos Volátiles promedio (SV) correspondientes al inóculo procedente de la PTAR, utilizando las ecuaciones 11 y 12, obteniendo valores de 2,807g L⁻¹ ST y 0,757 g L⁻¹ SV con desviación estándar de 0.201 ST y 0.044 SV.

Posteriormente, los valores se utilizaron para definir los términos involucrados en el cálculo de la mezcla de residuos con el inóculo y agua. Dichos términos se describen en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Registro de los cálculos de la mezcla residuos con inóculo.

Término	Definición del termino	Equivalencia de términos
---------	------------------------	--------------------------

$SV_{r(\%)} - DW$	$\frac{SV_{r(mgl-1)}}{ST_{r(mgl-1)}}$	$SV_{r(mgl-1)} = \frac{P_{SV(gr)}}{Vol_m(L)} * 1000$ $ST_{r(mgl-1)} = \frac{P_{ST(gr)}}{Vol_m(L)} * 1000$ $P_{SV(gr)} = \text{Peso (550 }^\circ\text{C)[g]} - \text{Peso crisol [g]}$ $P_{ST(gr)} = \text{Peso (105 }^\circ\text{C)[g]} - \text{Peso crisol [g]}$
$SV_{i(\%)} - DW$	$\frac{SV_{i(mgl-1)}}{ST_{i(mgl-1)}}$	$SV_{i(mgl-1)} = \frac{P_{SV(gr)}}{Vol_m(L)} * 1000$ $ST_{i(mgl-1)} = \frac{P_{ST(gr)}}{Vol_m(L)} * 1000$ $P_{SV(gr)} = \text{Peso (550 }^\circ\text{C)[g]} - \text{Peso crisol [g]}$ $P_{ST(gr)} = \text{Peso (105 }^\circ\text{C)[g]} - \text{Peso crisol [g]}$
$DW_{r(g)}$	$= m_{r(g)} - \left[m_{r(g)} * \frac{\sum H_{r(\%)}}{3} \right]$ $m_{r(g)} = 24$	$\sum H_{r(\%)} = 1 - \left[\frac{P_{ST(g)}}{m_{r(g)}} \right] \quad m_{i(g)} = 20$
$DW_{i(g)}$	$= m_{i(g)} - \left[m_{i(g)} * \frac{\sum H_{i(\%)}}{3} \right]$ $m_{i(g)} = 550$	$\sum H_{i(\%)} = 1 - \left[\frac{P_{ST(g)}}{m_{i(g)}} \right] \quad m_{i(g)} = 20$
$SV_{r(gr)}$ $SV_{i(gr)}$	$DW_{r(gr)} * \left[\frac{\sum [SV_r - DW(\%)]}{3} \right]$ $DW_{i(gr)} * \left[\frac{\sum [SV_r - DW(\%)]}{3} \right]$	$Vol_T(ml) = Vol_r(ml) + Vol_i(ml)$ $Vol_{r(ml)} = \frac{m_{r(gr)}}{\rho_r}, \quad Vol_{i(ml)} = \frac{m_{i(gr)}}{\rho_r}$ $\rho_r = \frac{\text{Peso } pb+r(g) - \text{Peso } pb(g)}{Vol_r(ml)}$

Como se presenta en la Tabla 2-5, se procedió a calcular $SV_{i(mgl-1)}$ y $ST_{i(mgl-1)}$ del inóculo con los valores de $P_{SV(gr)}$ peso de los sólidos volátiles, $P_{ST(gr)}$ peso de sólidos totales obtenidos con las ecuaciones (11) y (12) y $Vol_m(L)$ volumen de la muestra correspondiente a (0,02L).

Los valores obtenidos correspondientes a $ST_{i(mgl-1)}$ y $SV_{i(mgl-1)}$ se reemplazaron en la ecuación $SV_{i(\%)} - DW$ obteniendo un valor promedio de 27%. Luego, los sólidos volátiles

($SV_{i(gr)}$) y los sólidos totales ($ST_{i(gr)}$) del inóculo se calcularon reemplazando $SV_{i(\%)} - DW_{promedio}$ y $DW_{i(gr)}$ correspondiente a 1,5437 obteniendo un valor de $SV_{i(g)}$ de 0,4173. Así mismo, siguiendo la descripción anterior se calculó el valor de $SV_{r(g)}$ de residuos correspondiente a 0,1908.

Finalmente, los valores calculados correspondientes a gramos de sólidos volátiles (g SV) del inóculo (0,4173) y g SV del residuo (0,1908) se reemplazaron en la ecuación (14) que relaciona la proporción sustrato/inóculo (RIS) obteniendo un valor de 2. Este valor ratifica que la proporción de Sólidos Volátiles del inóculo es mayor a los SV del sustrato con el fin de minimizar los problemas de acidificación o inhibición como lo afirma Angelidaki *et al.*, (2016).

De esta forma, las cantidades de agua, inóculo y residuo estimadas tienen validez para el diseño del montaje de los tratamientos realizados por triplicado con diferentes concentraciones de carbón activado como se presenta en la Tabla 2-6

Tabla 2-6 Parámetros experimentales de Potencial bioquímico Metanogénico con los tratamientos 25 gramos de carbón activado de cuesco y comercial con residuos orgánicos de restaurante

Muestra	Descripción	pH inóculo	Muestra	Descripción	pH inóculo
A1	Agua:25ml inóculo: 550ml	7,369	CA-com1	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,173
A2	Agua:25ml inóculo: 550ml	7,387	CA-com2	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,191
A3	Agua:25ml inóculo: 550ml	7,387	CA-com3	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,162
IR1	Inóculo:550ml Residuo: 25ml	7,188	CA-BC1	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,199
IR2	Inóculo:550ml Residuo: 25ml	7,199	CA-BC2	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,172
IR3	Inóculo:550ml Residuo: 25ml	7,197	CA-BC3	Inóculo:550ml Residuo: 25ml CA: 25g	7,190

NOTA: Descripción de las condiciones experimentales del Potencial bioquímico Metanogénico acumulado utilizado para los tratamientos A4 (inóculo y agua), IR4 (inóculo y residuos orgánicos de comida), CA25-com (inóculo, residuos y 25g/L) y CA25-BC (inóculo, residuos y 25g/L).

2.1.2 Modelos teóricos predictivos de Potencial Bioquímico Metanogénico

Los resultados experimentales obtenidos del potencial bioquímico Metanogénico (PBM) en cada uno de los montajes descritos, fueron analizados utilizando la herramienta de programación MATLAB R2023b para calcular los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Logística (FL), modificado de Gompertz (GM) y Roediger, con el propósito de analizar a que curva se ajustan y de esta manera describir la cinética de producción de metano a lo largo del tiempo. En la Tabla 2-7 se describirán cuáles fueron los modelos matemáticos utilizados para analizar el ajuste de los datos obtenidos experimentalmente.

Tabla 2-7 Nombre del modelo, tipo de ecuación y parámetros.

Modelo	Ecuación	Parámetros
Modificado Gompertz	$G_{(t)} = G_o * \exp \left[- \exp \left\{ \frac{R_{m\acute{a}x} * e}{G_o} (\lambda - t) + 1 \right\} \right]$	$G_{(t)}$ = Producción acumulada de metano en un tiempo ($m^3Kg^{-1} SV^{-1}$) G_o = Máxima producción de metano acumulada ($m^3Kg^{-1} SV^{-1}$) $R_{m\acute{a}x}$ = Máxima velocidad de producción de metano en un tiempo ($m^3Kg^{-1} SV^{-1} d$) λ = Tiempo de adaptación del inóculo al sustrato (d) e = exponencial (1) = 2,7183 t = Tiempo de incubación. (d^{-1})
Logístico	$G_{(t)} = \frac{G_o}{1 + \exp \left[4 * R_{m\acute{a}x} \frac{(\lambda - t)}{G_o} + 2 \right]}$	G = Volumen del gas metano acumulado en el tiempo. (L) G_m = Volumen de metano acumulado máximo obtenido en un tiempo infinito de la digestión. (L) k = Constante cinética aparente para la producción de metano. (d^{-1})
Roediger	$G = G_m (1 - e^{-k*t})$	G = Volumen del gas metano acumulado en el tiempo. (L) G_m = Volumen de metano acumulado máximo obtenido en un tiempo infinito de la digestión. (L) k = Constante cinética aparente para la producción de metano. (d^{-1})

		$t =$ Tiempo de operación. (d^{-1}) $e =$ exponencial
--	--	---

En términos generales, los modelos Modificado de Gompertz y Logístico descritos en la Tabla 2-7 se reportan según Morales P.L. (2018) y Moharir S. (2020) y colaboradores como modelos que tienen un buen acercamiento al ajuste de la forma como ocurre la producción acumulada de biogás. Es decir, son modelos que describen el crecimiento exponencial inicial de la producción del biogás debido a factores como disponibilidad de nutrientes o condiciones favorables. Así mismo, a medida que los recursos se vuelven limitados, ocurre la desaceleración debido a las condiciones desfavorables o reducción de nutrientes.

Por lo tanto, en el modelo Gompertz el comportamiento de la generación del gas anteriormente descrito, es explicado con la función exponencial decreciente. La cual permite analizar como al inicio hay buena disponibilidad de sustrato y poca presencia de compuestos inhibidores como los AGV los cuales pueden limitar el proceso. Pero a medida que el tiempo avanza, la disponibilidad del sustrato disminuye haciendo que la tasa de producción de biogás disminuya gradualmente a medida que se acerca a un límite superior o una capacidad máxima.

En el caso del modelo logístico el cual se referencia como una extensión del modelo Gompertz en la cual se tiene en cuenta que, durante la acumulación de biogás, ya puede haber una cantidad inicial de gas en el sistema antes de que comience la producción. Por lo tanto, el modelo permite representar la acumulación de biogás a partir de cero y la acumulación adicional a partir de una cantidad inicial presente.

Por otro lado, con los modelos utilizados se obtuvo información relevante sobre el proceso de producción de biogás acumulada con los parámetros de Máxima producción de metano acumulada (G_0), Máxima velocidad de producción de metano ($R_{m\acute{a}x}$), Tiempo de adaptación del inóculo al sustrato (λ), Constante cinética aparente para la producción de metano K , correspondiente al modelo de Roediger. Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) y el Error Cuadrático Medio (RCM) fueron parámetros que indicaron la calidad del ajuste de cada modelo a los datos experimentales. A

continuación, se describe cada uno según lo reportado por Morales P.L., (2018) y Moharir S., (2020).

El parámetro Máxima producción de metano acumulada (G_0) según los autores, hace referencia a la cantidad máxima alcanzada de metano que se puede acumular, cuando se ha aprovechado completamente el sustrato orgánico disponible. Esto ocurre, gracias al trabajo realizado por los microorganismos al descomponer la materia orgánica o sustrato sintético y transformarlo en biogás. Por lo tanto, este parámetro depende de la cantidad y la calidad de sustrato utilizado ya que determinan el nivel de conversión del sustrato.

En cuanto a la máxima velocidad de producción de metano ($R_{m\acute{a}x}$) los autores hacen referencia a la velocidad a la que se convierte el sustrato a biogás. En ese sentido, su valor depende principalmente de factores como composición del sustrato y la concentración de microorganismos, así como de las condiciones específicas del sistema como temperatura y presencia de inhibidores. Por lo tanto, dichos factores pueden afectar de forma directa la capacidad de conversión del sustrato en biogás.

El tiempo de adaptación del inóculo al sustrato es referenciado como Lambda (λ) haciendo alusión al tiempo que toman los microorganismos iniciales en aclimatarse y desarrollar las poblaciones microbianas capaces de degradar el sustrato y transformarlo en biogás. De esta forma, los microorganismos van a requerir ajustar su metabolismo y activar sus enzimas para poder descomponer el sustrato y aumentar su población microbiana. Por lo tanto, es un parámetro que varía según factores como el tipo de sustrato, la temperatura y la presencia de compuestos tóxicos los cuales deberán aprender a tolerar los microorganismos para poder alcanzar la tasa máxima de producción de biogás.

En el caso del modelo Roediger se utiliza el parámetro conocido como la Constante cinética aparente para la producción de metano (k). El cual, hace referencia a la tasa de conversión de sustrato en biogás por unidad de tiempo. El parámetro indica que tan rápido ocurre la producción de biogás en relación con la cantidad de sustrato presente en el proceso de DA. Como en el caso de los parámetros anteriores, su valor también puede variar a lo largo del proceso de DA a medida que los microorganismos se adaptan al sustrato y según las condiciones de operación implementadas.

Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) y el Error Cuadrático Medio (RCM) son dos parámetros utilizados para evaluar la calidad del ajuste de los datos experimentales a los modelos mencionados. Con respecto a R^2 indica la capacidad del modelo en explicar la totalidad de las variaciones en los datos y predecir con precisión los valores obtenidos. Por lo tanto, un valor alto igual a 1 indica un buen ajuste de los datos y un valor de 0 representa que el modelo no consiguió explicar la variabilidad de los datos. De igual forma, el valor de R^2 igual a 0 y 1 se consideran casos ideales ya que los valores oscilan en puntos intermedios entre ambos valores.

En cuanto al Error Cuadrático Medio (RCM) se utiliza como una métrica que permite comparar diferentes modelos y seleccionar el mejor ajuste. Por lo tanto, un valor alto indica mayores diferencias entre los valores obtenidos experimentalmente y los predichos lo cual se traduce en tener menor proporción del modelo, caso contrario, cuando el valor es bajo, el cual indica una mayor precisión durante la predicción de los valores obtenidos experimentalmente.

2.1.3 Análisis estadístico de resultados obtenidos en cada montaje experimental.

Se realizó un análisis de varianza de una vía (un solo factor) con esquema de aleatorización completamente al azar, es decir la única fuente de variación fueron las dosis de carbón activado comercial implementadas 0g/L, 10 g/L, 15 g/L, 25 g/L, 30 g/L y 35 g/L con sustrato sintético (celulosa). Así mismo, se aplicó un ANOVA para evaluar las diferencias significativas entre las diferentes dosis de carbón activado obtenido de cuesco de palma evaluadas 0g/L, 10 g/L, 15 g/L, 20g/L y 25 g/L con celulosa.

Finalmente, se realizó un análisis de varianza entre los 2 grupos con la dosis adecuada, utilizando CA comercial y los residuos orgánicos de alimentos (grupo 1) y CA de cuesco de palma y los residuos orgánicos de alimentos identificado (grupo 2). El ANOVA fue usado para evaluar las diferencias significativas de cada grupo. Posteriormente, se utilizó la prueba Tukey para determinar las medias muestrales con un nivel de significación fijado en $p < 0,05$.

2.2 Resultados de las mediciones experimentales.

En esta sección, se describen los resultados obtenidos en el ensayo del Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM) obtenidos con celulosa (sustrato seco), lodo floculento activo (inóculo), residuos orgánicos como sustrato con las diferentes dosis de carbón activado. Finalmente, se presentarán los resultados obtenidos con los modelos cinéticos Función Logística (FL), Modificado de Gompertz (GM) y Roediger que permitieron analizar la cinética del proceso de digestión anaerobia y finalmente el ANOVA de cada uno de los ensayos.

- **Montaje 1**

En el montaje 1 el proceso de digestión anaerobia fue evaluado por 69 días, a través de la medición de la curva de producción de metano para cada tratamiento. Como se muestra en la Figura 2-4 la producción de metano fue de 2.83, 2.78 y 3.22 L/gSV al utilizar CA comercial de 10 g/L, 15 g/L, 20 g/L con desviaciones estándar de 0.24, 0.01 y 0.01. Por lo tanto, se evidencio que sin carbón activado se obtuvo la menor producción de metano 0.57 L/gSV (inóculo y agua) y 2.08 L/gSV (inóculo y celulosa) con desviación estándar de 0.03 y 0.58.

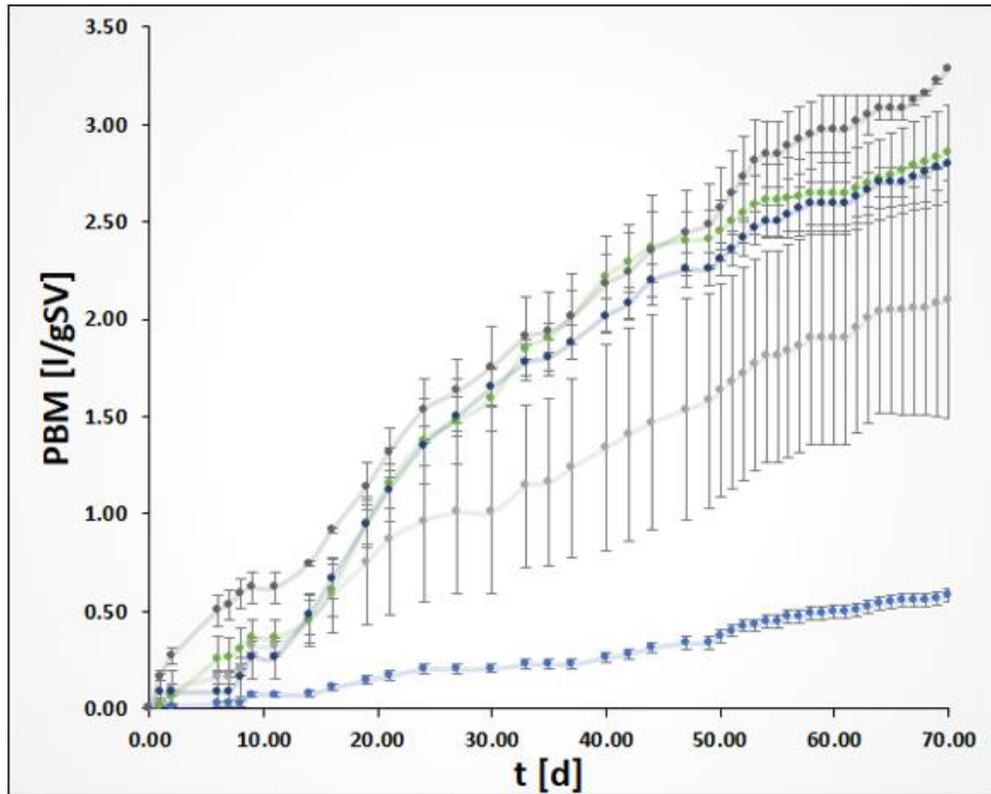


Figura 2-4 PBM acumulado para los tratamientos A1 (●) (inóculo y agua), C1 (●) (inóculo y celulosa), CA10-com (●) (inóculo, celulosa y 10g/L), CA15-com (●) (inóculo, celulosa y 15g/L), y CA20-com (●) (inóculo, celulosa y 20g/L).

De la Figura 2-4 se puede observar cómo se alcanzó la mayor producción de metano con 20g/L de carbón activado comercial. Así mismo, en ese tratamiento en específico se observó una tendencia a seguir incrementando su producción de metano. Por esta razón, se realizó un segundo montaje con el propósito de analizar el efecto de concentraciones superiores a 20g CA comercial en la digestión anaerobia. Para esto, se evaluaron concentraciones de carbón activado de 25, 30 y 35 g con celulosa como sustrato sintético.

• Montaje 2

En el montaje 2 el proceso de digestión anaerobia tuvo una duración de 53 días en los cuales fue evaluado la producción de metano en los experimentos que contienen concentraciones de carbón activado comercial correspondientes a 25g/L, 30g/L y 35g/L. (ver Figura 2-5).

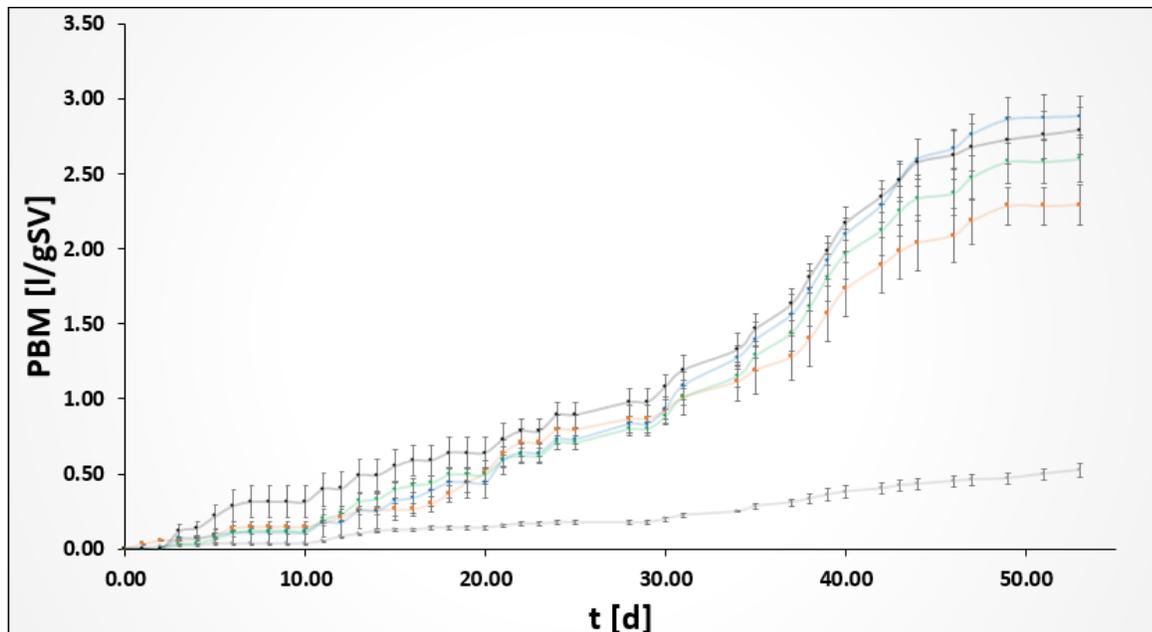


Figura 2-5 PBM acumulado A2 (●) (inóculo y agua), C2 (●) (inóculo y celulosa), CA25-com (●) (inóculo, celulosa y 25g/L), CA30-com (●) (inóculo, celulosa y 30g/L), y CA35-com (●) (inóculo, celulosa, 35g/L).

Con respecto al montaje 2, se puede observar en la Figura 2-5, el día 49 se alcanzó el pico en volumen acumulativo de metano, con un valor de 2.86 L/gSV con 25g/L y 2.72 L/gSV con 35 g/L de CA registrando una desviación estándar de 0.15 y 0.16. En contraste, en los tratamientos sin CA se obtuvo un PBM de 0.47 g/L (inóculo y agua) y 2.28 g/L (inóculo y celulosa) con una desviación estándar de 0.04 y 0.12. Esto demuestra un impacto positivo en incrementar el potencial bioquímico metanogénico por usar carbón activado que se puede superar el 40% de la producción de metano sin usarlo.

Además, se pudo observar que al utilizar 30 g/L registró una desviación estándar 0.15 y produjo una concentración inferior de biogás de 2.58 L/gSV en contraste al utilizar 35 g/L CA; lo cual se puede deber a pérdidas o fugas al momento de la medición.

Por lo tanto, utilizando las mismas dosis anteriormente utilizadas de 10 g/L, 15 g/L, 20 g/L, 25 g/L de CA se elaboró un tercer montaje donde se evaluó el efecto del CA de cuesco de palma sobre la variable de estudio (producción de metano) con sustrato sintético durante el proceso de digestión anaerobia.

- **Montaje 3**

En el montaje 3 se evaluó el efecto de las diferentes dosis de carbón activado obtenido de cuesco de palma en la producción de metano durante 58 días como se puede observar en la Figura 2-6.

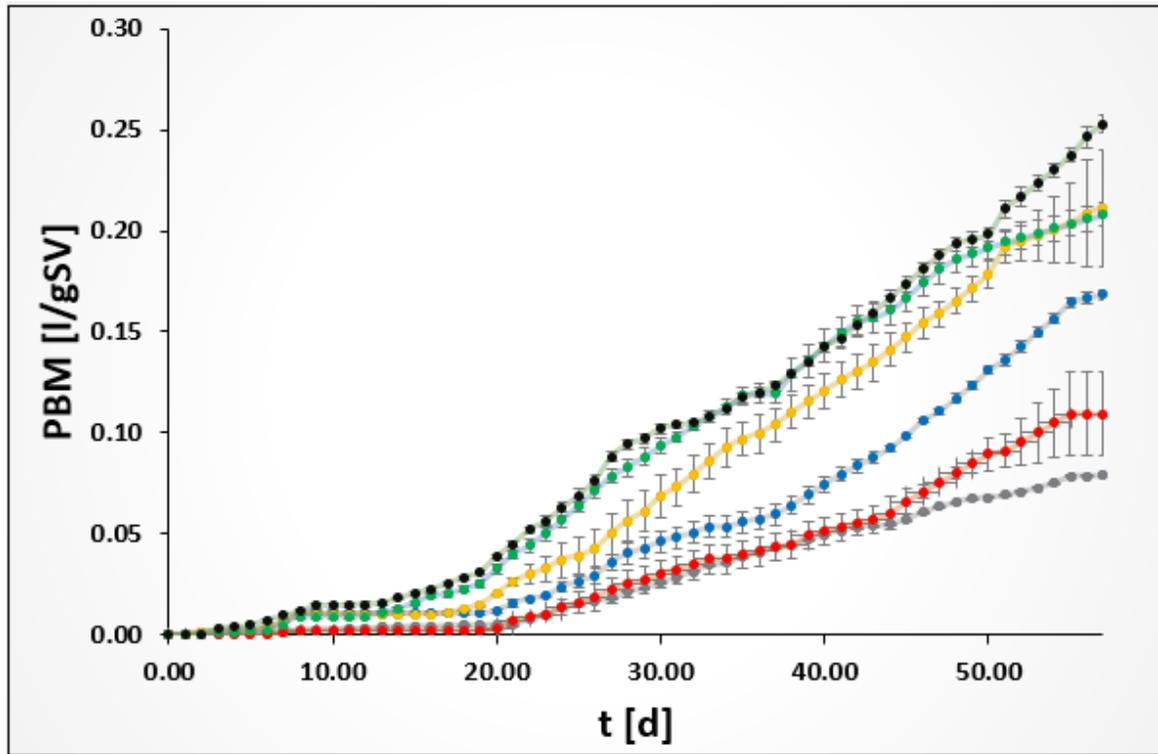


Figura 2-6 PBM acumulado A3 (●) (inóculo y agua), C3 (●) (inóculo y celulosa), CA10-BC (●) (inóculo, celulosa y 10g/L Carbón activado (CA) biochar (BC)), CA15-BC (●) (inóculo, celulosa y 15g/L), CA20-BC (●) (inóculo, celulosa y 20g/L) y 25CAc (●) (inóculo, celulosa, 20g/L CA cuesco).

En la Figura 2-6 se evidenció que la máxima producción de metano correspondió a 0.25 L/gSV con 25 gramos de CA-BC, 0.21 L/gSV con 20g CA-BC y 0.21 L/gSV con 15g CA-BC y 0.17 L/gSV con 10g CA-BC. En contraste, se identificó que sin carbón activado se obtuvo la menor producción de metano de 0.11 L/gSV (inóculo y celulosa) y 0.08 L/gSV (inóculo y agua). Registrando una desviación estándar de 0.00, 0.01, 0.03. y 0.00 correspondiente a las concentraciones de carbón activado comercial de 25, 20, 15 y 10gCA. Con respecto al inóculo y agua correspondió a 0.00 y 0.02 en inóculo y celulosa.

Además, los resultados ratifican que la concentración de 25 g/ L de CA fue la que más favoreció el proceso de digestión anaerobia, permitiendo una mayor producción de metano. Por lo tanto, la máxima producción de metano fue de 0.25 L/gSV al utilizar el 25CA de cuesco de palma y en el segundo Montaje también obtuvo con 25 CA comercial evaluado correspondiente a 2.86 L/gSV.

De esta forma, se seleccionó la concentración de 25g/L de CA como la concentración adecuada y fue utilizada en un cuarto montaje donde se evaluó el PBM en presencia de residuos orgánicos de alimentos obtenidos del restaurante de la Universidad Nacional de Colombia como se presenta a continuación.

• Montaje 4

En el montaje 4 el proceso de digestión anaerobia fue evaluado por 58 días, como se muestra en la

Figura 2-7 donde se observó el impacto del carbón activado en el proceso de degradación de los desechos orgánicos de alimentos.

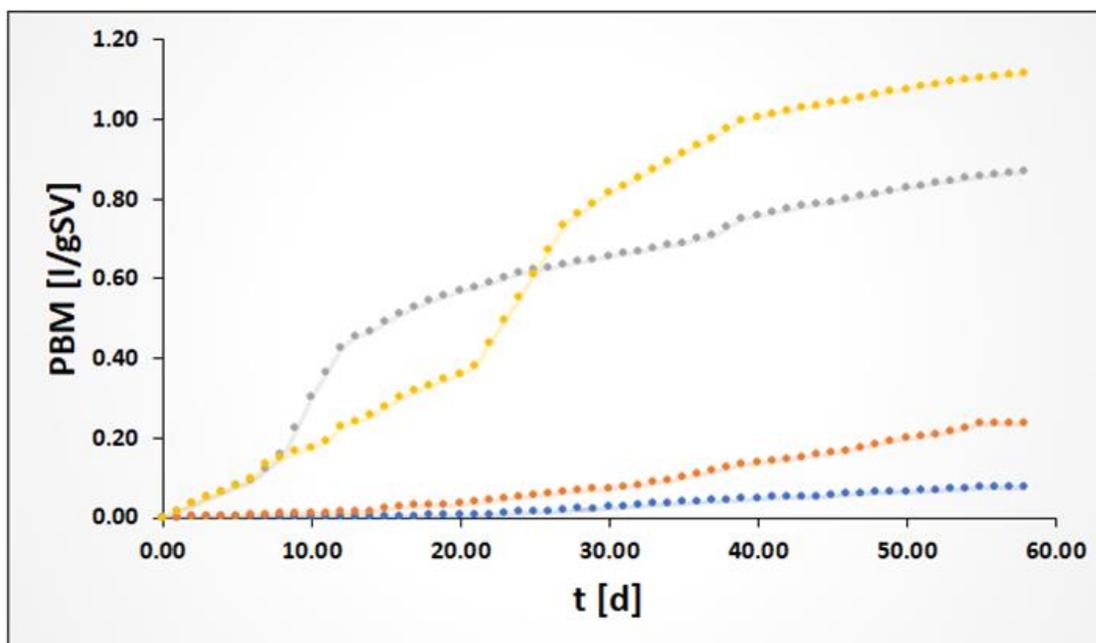


Figura 2-7 PBM de metano acumulado para tratamientos A (●) (inóculo y agua), IR (●) (inóculo y residuos orgánicos de comida), CA25-com (●) (inóculo, residuos y 25g/L) y CA-BC (●) (inóculo, residuos y 25g/L).

En la

Figura 2-7, se evidenció que la máxima producción de metano correspondió a 1.11 L/gSV con 25g CA-BC registrando una desviación estándar de 0.31. Por otro lado, con 25g CA-com se obtuvo la máxima producción de metano de 0.87 L/gSV con una desviación estándar de 0.07. A su vez, se evidenció que sin carbón activado se obtuvo una producción de metano con inóculo y Residuos (IR) de 0.23 L/gSV y inóculo y agua (IA) de 0.08 L/gSV. Con desviación estándar de 0.02 (IR) y 0.01 (IA).

2.2.1 Verificación de modelos teóricos

Los resultados experimentales de cada montaje fueron contrarrestados con el modelo Modificado de Gompertz donde G_0 es la Máxima producción de metano acumulada (m^3/kg SV), $R_{máx}$ es la Máxima velocidad de producción de metano (m^3/kg SV* d), λ es el Tiempo de adaptación del inóculo al sustrato (días), k es la constante cinética aparente para la producción de metano, correspondiente al modelo de Roediger. A su vez, se presenta el coeficiente de determinación (R^2) y el Error Cuadrático Medio (RCM) para indicar la calidad del ajuste de cada modelo a los datos experimentales. Cabe resaltar que las tablas mencionadas durante toda la sección se ubicarán en la sección anexos.

- **Montaje 1**

Los resultados experimentales del PBM a 10g/L, 15g/L y 20g/L de CA-com y Celulosa, evaluados con el modelo cinético logístico presentaron un coeficiente de correlación promedio de ($R^2 > 0,98$), presentando un Error Cuadrático Medio (RCM) inferior a 1 en todos los casos. Lo cual reflejó un buen ajuste de los datos indicándose en la Tabla 3-1 Anexo M1.

En términos de periodo de latencia (λ), se evidenció que el modelo Logístico mostró que al utilizar 20g/L de CA-com se presenta la menor reducción en términos de días para que los microorganismos tengan afinidad por el sustrato y la máxima producción de metano correspondiente 3.22 m^3/Kg SV.

Por lo tanto, en términos generales los modelos cinéticos según Figura 0-1 M1.1 mostraron que al utilizar 20g de CA-com los microorganismos maximizaron su capacidad de producir biogás. A su vez, se evidenció como el tiempo de adaptación es un factor determinante

para los microorganismos, ya que requieren adaptarse a las condiciones particulares de cada tratamiento. Finalmente, con respecto al modelo modificado de Gompertz y Roediger los datos obtenidos con las distintas concentraciones de carbón activado se acoplaron en menor proporción.

- **Montaje 2**

Los resultados experimentales del PBM correspondientes a los tratamientos 25g/L, 30g/L y 35g/L de CA-com y Celulosa Tabla 0-1 Anexo M2, una vez fueron evaluados con los modelos cinéticos Modificado de Gompertz presentaron un coeficiente de correlación ($R^2 > 0,98$) un valor de Error Cuadrático Medio (RCM) de 0.11, 0.11 y 0.12 en cada tratamiento. Indicando que los datos experimentales se ajustaron completamente en la mayoría de los casos.

Con respecto al parámetro cinético periodo de latencia (Λ), se evidenció como los microorganismos al interactuar con las diferentes condiciones de los tratamientos requieren tiempos de adaptación para lograr producir de manera eficiente biogás. Es decir, requieren según su actividad metabólica ajustar sus enzimas y adaptarse a las diferentes condiciones según las dosis de carbón (25, 30 y 35g) para producir biogás de forma eficiente.

Por lo tanto, la máxima producción de metano se presentó en los tratamientos donde se utilizó CA los cuales mantuvieron una proporción similar de biogás. En contraste, los ensayos donde no se utilizó CA-com presentaron los valores más bajos con respecto a la producción de metano.

Según los resultados observados se pudo revalidar que los valores de los parámetros cinéticos del modelo Modificado Gompertz Figura 0-1 Anexo M2.2, se ajustaron a los datos experimentales. En ese sentido, se pudo observar que efectivamente al utilizar 25 gramos de CA los microorganismos maximizaron su capacidad de producir biogás. Particularmente, se observó al analizar el valor máximo de producción de biogás en cada

caso; este mantuvo un valor similar entre las dosis de CA evaluadas y la menor producción de biogás se presentó en los tratamientos sin carbón activado.

- **Montaje 3**

Los resultados experimentales del PBM correspondientes a los tratamientos 10g/L, 15g/L, 20g/L y 25g/L de CA-BC y Celulosa, indicaron que los microorganismos utilizados para iniciar y acelerar la actividad de degradación de la celulosa sin CA requirieron mayor tiempo de adaptación. Esto se evidenció al obtener una menor producción de biogás en los tratamientos sin CA. Por lo tanto, esto deja en evidencia que, aunque el lodo utilizado prevenga de la misma fuente, la capacidad de descomposición de materia orgánica de los microorganismos varía según su composición microbiana; ya que, aunque el lodo provenía de la misma fuente como en el primer montaje, en este caso se registró un mayor tiempo de adaptación lo cual puede deberse a las variaciones entre las poblaciones de microorganismos o su actividad metabólica afectando el tiempo de adaptación.

Por otro lado, en la inspección visual correspondiente a la Figura 0-1 Anexo M3.3 se observó que la dosis de CA sí favoreció la producción de biogás y tuvo un impacto en el tiempo de adaptación lo cual dependió no solamente de la dosis del carbón activado sino también de la capacidad metabólica de los microorganismos para producir y ajustar sus enzimas a las condiciones experimentales. Especialmente, se observó que al utilizar 25g/L de CA, los microorganismos maximizaron su capacidad de producción de biogás y la menor producción se presentó en los tratamientos sin CA.

Además, se pudo observar que en los modelos cinéticos Modificado de Gompertz y Logístico se ajustaron a los datos experimentales, lo cual se vio reflejado en el coeficiente de determinación (R_2) y el valor del Error Cuadrático Medio (RCM) en todos los tratamientos. En el caso particular del modelo de Roediger, ninguno de los tratamientos con las distintas concentraciones de CA obtenido del cuesco de palma se acopló, lo cual se puede también observar al comparar los resultados obtenidos en el primer montaje con carbón activado con las mismas dosis.

- **Montaje 4**

Los resultados obtenidos entre los tratamientos con 25g de CA-com y 25 g de CA-BC en el Montaje 4, reflejaron la máxima producción de metano acumulada en los tratamientos con cuesco de palma, y la menor producción de biogás en los tratamientos sin carbón activado. Esto puede deberse a la presencia de grupos funcionales de tipo hidroxilo que favorecieron la transferencia de electrones Inter especies según el Education department Open Textbook Pilot.

Por lo tanto, analizando los resultados de caracterización del CA de cuesco de palma posiblemente la razón por la cual el carbón activado favoreció la producción de metano es debido a las interacciones entre los grupos funcionales identificados en las estructuras del CA (Uniones dobles tipo C=O (cetonas, aldehídos, ácidos carboxílicos y ésteres) con los grupos funcionales específicos en la superficie de los microorganismos. Lo cual según Borja R. y Rincón B., (2017), permite que los microorganismos metanogénicos presentes en el proceso de DA tengan la capacidad de aprovechar el ambiente reductor para reducir el dióxido de carbono y producir metano.

En segunda instancia, según Loveday, O and Echeverria., (2021) los grupos funcionales metilo (C-H del grupo alifáticos tipo CH₃ y CH₂) los cuales también tuvieron una presencia en las muestras de carbón activado analizadas, posiblemente afectaron la polaridad del enlace o disposición tridimensional de otros grupos funcionales presentes en el medio, haciéndolos más accesibles a formar puentes de hidrogeno con otras moléculas. Lo cual se podría tener en cuenta como un mecanismo indirecto promotor de la transferencia de electrones para favorecen la producción de metano.

Por otro lado, con respecto al tiempo de adaptación en este ensayo los microorganismos requirieron mayor tiempo de adaptación que en los tratamientos sin CA lo cual puede deberse a su actividad metabólica afectando el tiempo de adaptación como se argumentó anteriormente en el montaje 3. Esto es debido a que en ambos ensayos se utilizó el mismo lodo inoculante el cual contenía microorganismos con las mismas condiciones por lo que en ambos casos se presentó un mayor tiempo de adaptación en los tratamientos sin CA.

Finalmente, en la inspección visual de los resultados Figura 0-1 Montaje 4.4 se pudo observar que efectivamente al utilizar 25 gramos de CA los microorganismos maximizaron su capacidad de producción de biogás. Especialmente al utilizar CA a partir de cuesco de palma el cual proporcionó un entorno más favorable para los microorganismos producir biogás, viéndose reflejado en su mayor actividad microbiana y adaptación al CA utilizado en este ensayo.). Ryue., *et al* (2019) obtuvo mejoras en el proceso de DA al utilizar 25g/L de CA granular para obtener 700L/kg SV. Asi mismo, Fanghua., *et al* (2012).

Los resultados experimentales del PBM correspondientes a los tratamientos con 25g/L de CA comercial y 25g/L de CA cuesco de palma con residuos presentaron un coeficiente de correlación inferior a 1 con los datos experimentales de todos los tratamientos evidenciándose en la Tabla 0-1 Anexo M4. Por lo tanto, se observó que los datos experimentales obtenidos con 25g/L de CA cuesco se ajustaron favorablemente a los modelos Gompertz y Logístico modelos cinéticos evidenciándose en la Figura 0-1 Anexo M4. En el caso, del tratamiento con 25g/L de CA comercial con residuos no se ajustaron en algunos puntos de los modelos Gompertz y Logístico, reflejando baja calidad del ajuste de los datos experimentales. Así mismo, en ambos casos ningún tratamiento se ajustó al modelo Roediger, lo cual también se observó en el montaje 3 donde se utilizó cuesco de palma.

2.2.3 Análisis comparativo de los diferentes resultados experimentales.

Se realizó un análisis de varianza con esquema de aleatorización completamente al azar con única fuente de variación (ANOVA) entre los tratamientos de los montajes 1 y 2 correspondientes a A1 y A2 (inóculo y agua), C1 y C2 (inóculo y celulosa), CC10-com y CC25-com (inóculo, celulosa, 10 g/l y 25g/L), CC15-com y CC30-com (inóculo, celulosa, 15g/L y 30g/L), y CC20-com y CC25-com (inóculo, celulosa, 20g/L y 35g/L).

Por lo tanto, con los resultados del ANOVA se evaluaron las diferencias significativas de cada grupo como se pueden observar en la Figura 2-8.

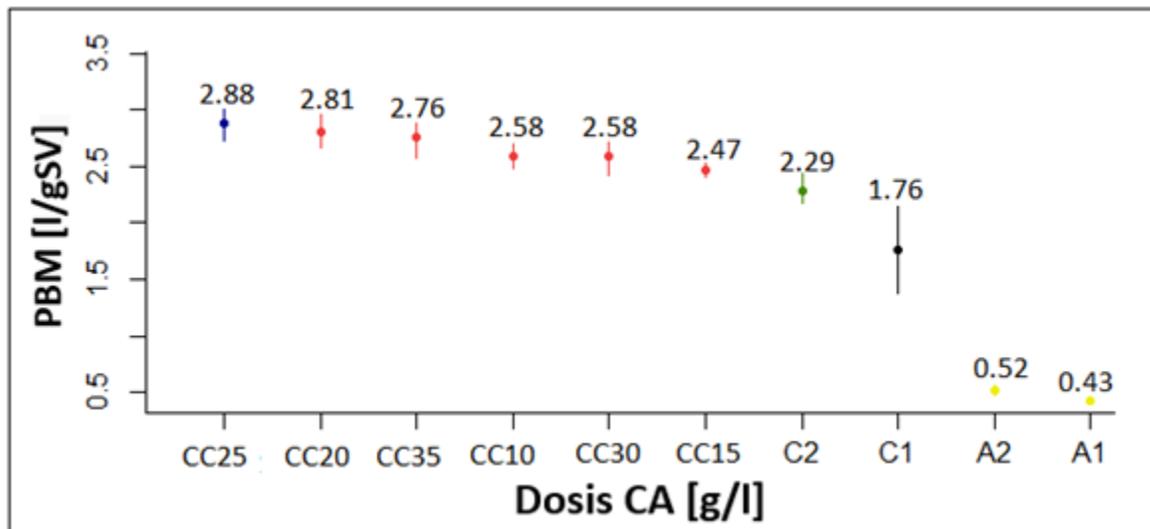


Figura 2-8 Comparación de montajes 1 y 2 mediante el análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de CA) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte en el día 53 con 10,15,20,25,30 y 35g/L CC-com.

En la Figura 2-8 los resultados indicaron un valor p menor al nivel de significancia (0,05) y no se identificaron diferencias significativas entre las concentraciones de CA del primer montaje. En contraste con el segundo montaje, aunque la mayor producción de biogás se da a 25g/L de CC-com, se presentaron diferencias significativas entre los inóculos y sustrato lo cual permite concluir que no se pueden comparar los datos entre los tratamientos.

Por lo tanto, se procede a realizar el análisis de comparación entre los mismos tratamientos del montaje 1 como se puede observar a continuación en la Figura 2-9

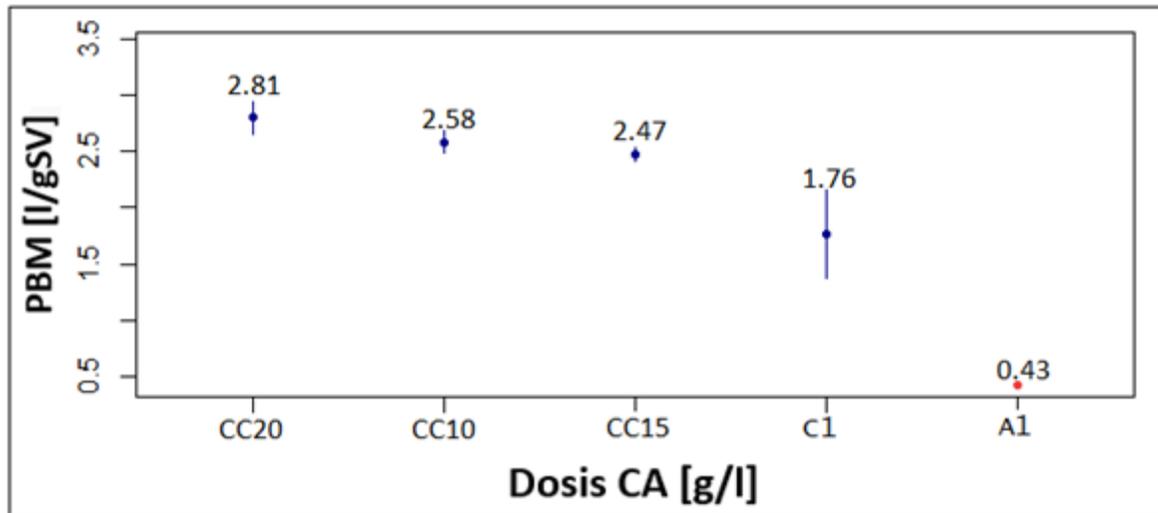


Figura 2-9 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de carbón activado comercial) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 53 en los tratamientos 10, 15, 20 gramos de CA comercial

Según la Figura 2-9, se obtuvo un valor p menor al nivel de significancia (0,05) y como se puede observar para el día 53 no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones CC20, CC15 y CC10. Lo cual permite concluir que el CA-com tiene un impacto positivo en la producción de biogás y en mayor cantidad donde se utilizó CC20-com para el día 53.

Por otro lado, se realizó la comparación entre los tratamientos del montaje 2 correspondientes a A2 (inóculo y agua), C2 (inóculo y celulosa), CC25 (inóculo, celulosa, 25g/l CC-com), CC30 (inóculo, celulosa, 30g/L), y CC35 (inóculo, celulosa, 35g/L) como lo indica la siguiente Figura 2-10

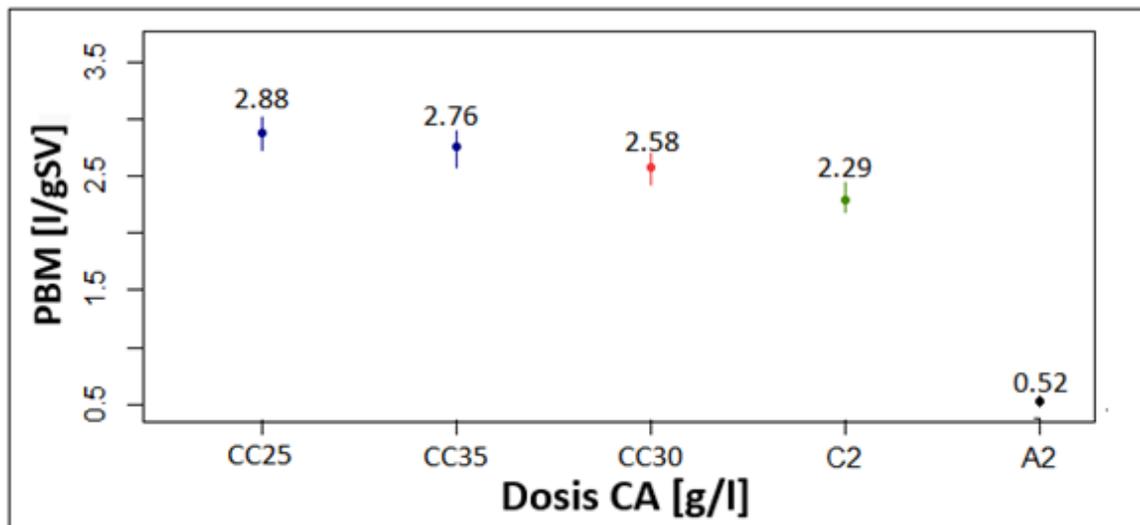


Figura 2-10 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de carbón activado comercial) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 53 en los tratamientos 25,30,35 gramos CA- com.

Con base en la Figura 2-10, se obtuvo un valor p menor a el nivel de significancia (0,05) y como se puede observar no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones CC35, CC25 y CC30. Lo cual permite concluir que los tratamientos generan un impacto similar en contraste con el inóculo y el sustrato.

Con respecto al montaje 3, se realizó la comparación entre los tratamientos correspondientes a A3 (inóculo y agua), C3 (inóculo y celulosa), CC10-BC (inóculo, celulosa, 10 g/l), CC15-BC (inóculo, celulosa, 15g/L), CC20-BC (inóculo, celulosa, 20g/L) y CC25-BC (inóculo, celulosa, 25g/L CA biochar) como se presenta en la figura Figura 2-11 .

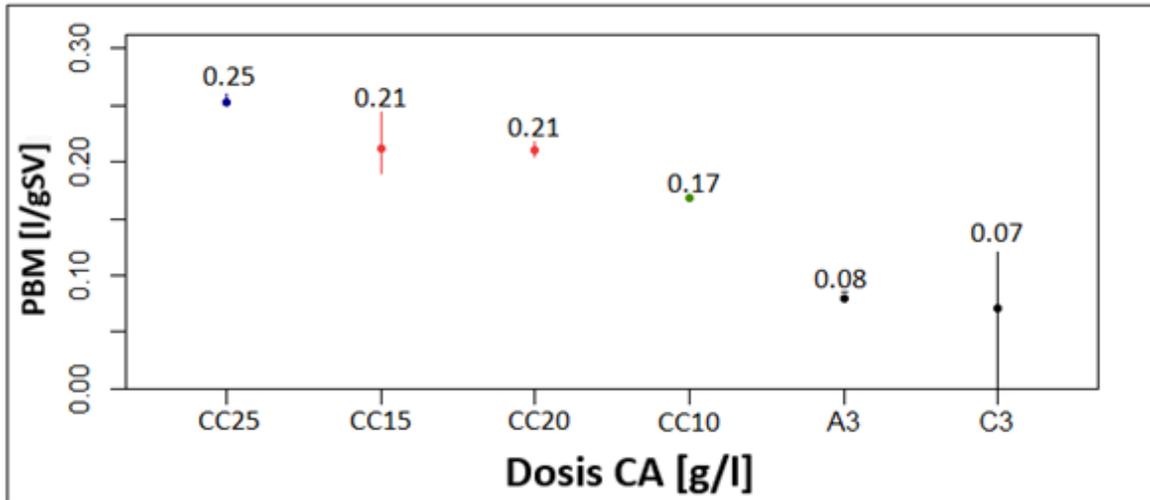


Figura 2-11 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (Dosis de CC-BC) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 58 en los tratamientos 10,15,20 y 25 gramos CC-BC

De acuerdo con lo presentado en la Figura 2-11, se obtuvo un valor p menor a el nivel de significancia (0,05) y como se puede observar no hay diferencias significativas entre las concentraciones CC20 y CC15. Lo cual permite concluir que el tratamiento con CC25-BC genera el mayor impacto, siendo significativamente diferente de las demás condiciones evaluadas (C3,A2 y CC10).

Finalmente, se realizó la comparación entre los tratamientos del montaje 4 correspondientes a A4 (inóculo y agua), HR4 (inóculo y residuo), CC25-BC (inóculo, residuo,25g/l carbón activado de biochar (BC) y CC25-com (inóculo, residuo,25g/l de CA comercial (com) como se muestra en la siguiente figura Figura 2-12.

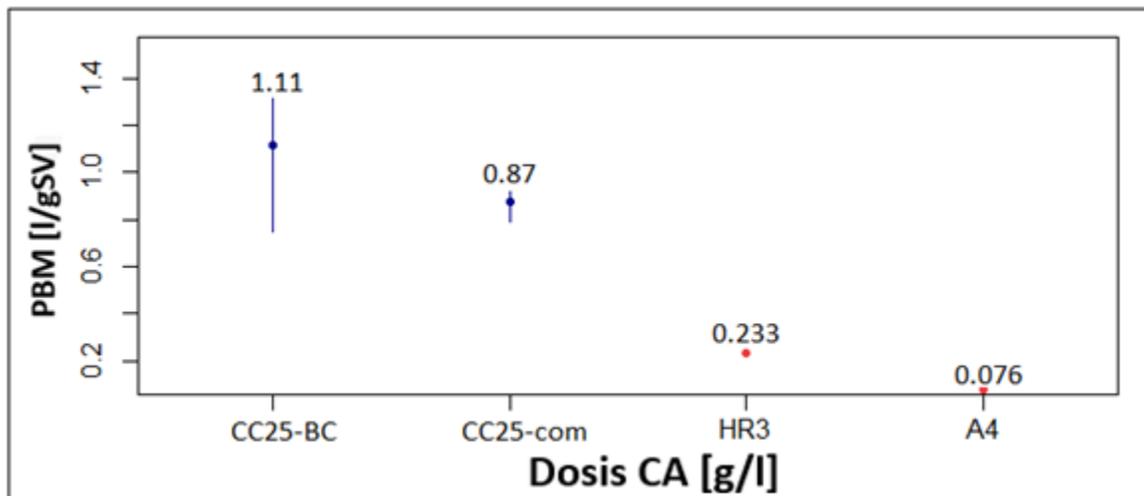


Figura 2-12 Análisis estadístico Tukey (anova) para conocer el efecto del factor (25g/L de dosis CC-BC y CC- com) sobre la variable respuesta (Generación de metano) en un tiempo de corte correspondiente al día 58 en los tratamientos con residuos de alimentos

Según la Figura 2-12, se obtuvo un valor p menor a el nivel de significancia (0,05) y no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones CC25-BC y CC25-com en el día 58. Lo cual permite concluir que el CA tiene un impacto positivo en la producción de biogás en comparación a los tratamientos donde no se utilizó CA.

2.3 Conclusiones y Recomendaciones

En este estudio se pudo observar que, en los ensayos con celulosa, la cinética de producción de metano alcanzó la mayor producción de metano con 25 gramos de carbón activado, lo cual guardó relación con la alta biodegradabilidad de la celulosa utilizada como sustrato en todos los tratamientos.

El uso de celulosa en los ensayos de PBM facilitó el proceso de transformación de sustrato a biogás. No obstante, se recomienda realizar mezclas de celulosa y otros sustratos como la tributirina al fin de obtener resultados importantes al evaluar la actividad del inóculo en la cinética de degradación utilizando más de una molécula.

En términos generales, los resultados obtenidos de PBM con CA-BC y CA-com mostraron que utilizar concentraciones entre 10 y 15g/L favoreció la formación de metano, sin obtenerse su máxima capacidad de producción.

La mayor producción de metano con 20g/L y 25g/L fue de 2.81 y 2.88 PBM/gSV con CA-com. Lo cual permite concluir que la dosis adecuada correspondió a la dosis con 25g/L. A su vez, utilizar concentraciones superiores correspondientes a 30g/L y 35g/L generó la menor producción de biogás de 2.58 y 2.76 PBM/gSV con CA-com. El CA-BC mejora la producción de metano con 25g/L y en menor proporción al utilizar dosis bajas de 10, 15 y 20g/L.

Los rendimientos de metano obtenidos con la adición de carbón activado de cuesco de palma, fueron superiores que en los casos donde se utilizó carbón activado comercial. Esto posiblemente es debido a la presencia de grupos funcionales específicos en la estructura porosa del CA de tipo carboxilo, hidroxilo y metilos. Los cuales, pueden favorecer la formación de un ambiente reductor el cual es aprovechado por los microorganismos metanogénicos, utilizando el hidrogeno como donador de electrones para reducir el CO₂ y generar metano.

El modelo de Gompertz se adaptó mejor a los datos experimentales obtenidos, con un coeficiente de correlación promedio de ($R^2 > 0,98$), presentando un Error Cuadrático Medio

(RCM) inferior a 1 en todos los casos. Así mismo, pudo predecir las duraciones de las fases de retraso en los experimentos estudiados. Por lo tanto, el modelo de Gompertz fue adecuado para determinar el potencial de producción de biogás.

La metodología propuesta para cuantificar la cantidad de biogás permitió determinar indirectamente la cantidad de biogás obtenido en cada uno de los tratamientos con sustrato sintético y desechos orgánicos de restaurante. Por lo tanto, es una estrategia que proporcionó ventajas asociadas al poder obtener reproducibilidad de los datos y valores comparables con respecto a métodos automatizados complejos.

No obstante, la solubilización del CO_2 en el medio líquido como solución barrera, se puede ver afectada por cambios en la presión, saturación, temperatura, fugas, lo cual genera variaciones en los resultados repercutiendo en reportarse fallas en la cuantificación del biogás lo cual deberá ser corregido.

.

3. Anexos A: Parámetros cinéticos Montaje 1

Tabla 3-1 Anexo M1 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20g/L CAcomercial y celulosa

Agua e inóculo (A1)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.75	5.23
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.01	-0.71	
Lambda (d)	14.61	-8.13	
Kh (d ⁻¹)			0.00
R ²	0.99	-2.93	0.98
RCM	0.02	0.38	0.03

Celulosa e inoculo (C1)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	2.19	2.43
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.04	0.04	
Lambda (d)	5.08	2.80	
Kh (d ⁻¹)			0.07
R ²	0.98	0.99	0.99
RCM	0.09	0.06	0.05

Celulosa y CC10-com			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	2.75	2.89
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.07	0.07	
Lambda (d)	7.87	6.00	
Kh (d ⁻¹)			0.01
R ²	0.99	0.99	0.98
RCM	0.08	0.05	0.14

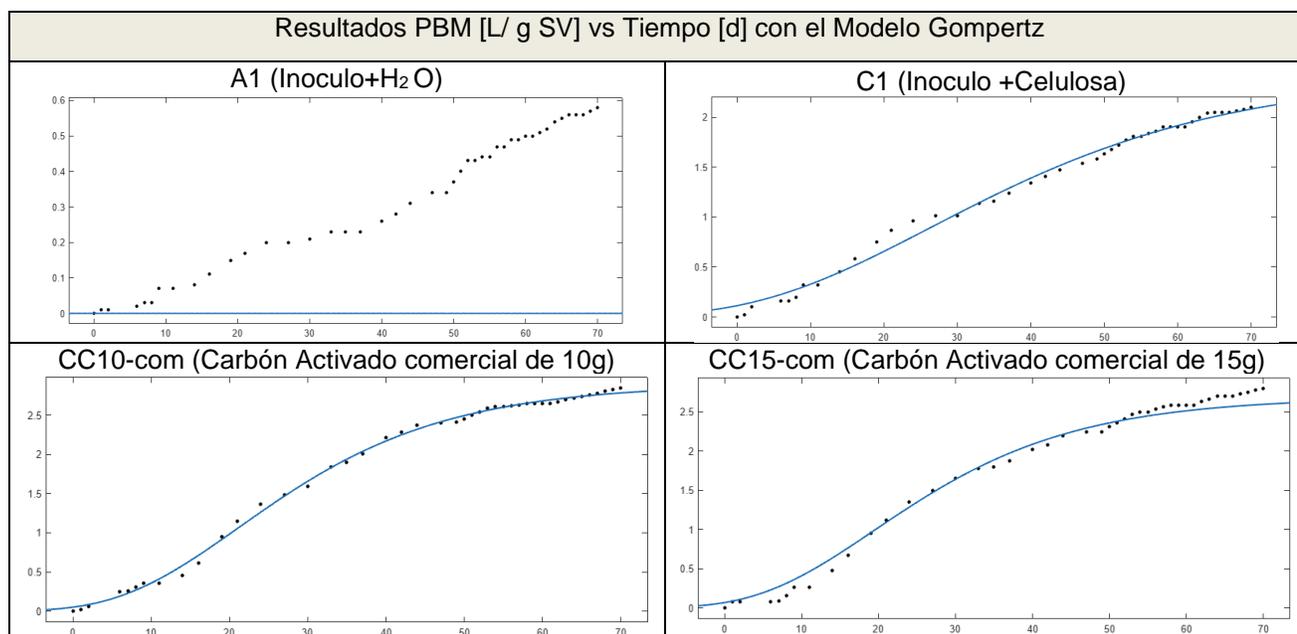
Celulosa y CC15-com			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger

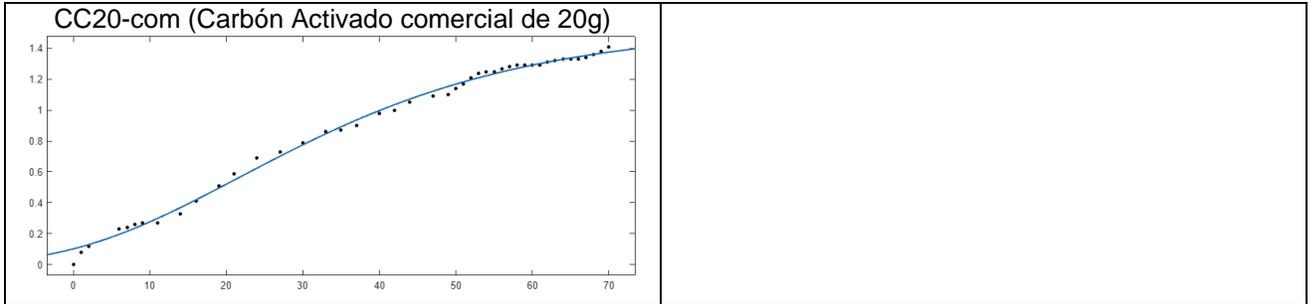
Go (m ³ /Kg SV)	2.69	2.69	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.07	0.07	
Lambda (d)	7.86	4.48	
Kh (d ⁻¹)			0.01
R ²	0.99	0.99	0.98
RCM	0.12	0.11	0.14

Celulosa y CC20-com			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
Go (m ³ /Kg SV)	3.34	3.69	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.06	0.06	
Lambda (d)	1.96	-0.12	
Kh (d ⁻¹)			0.01
R ²	0.99	0.99	0.99
RCM	0.10	0.07	0.06

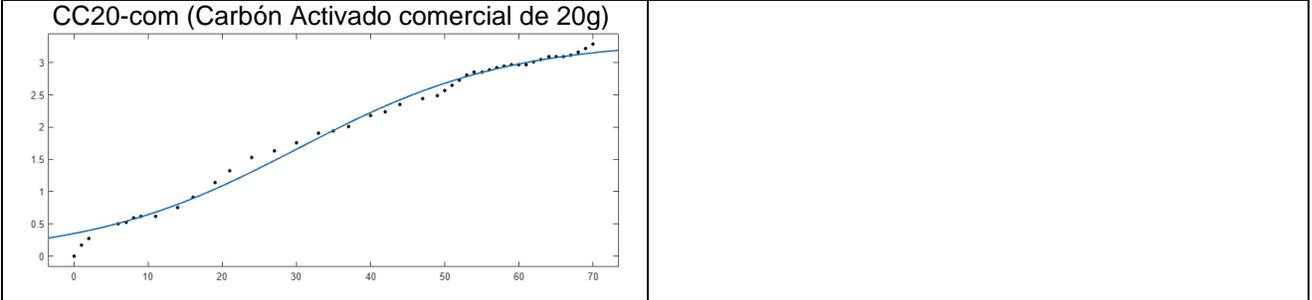
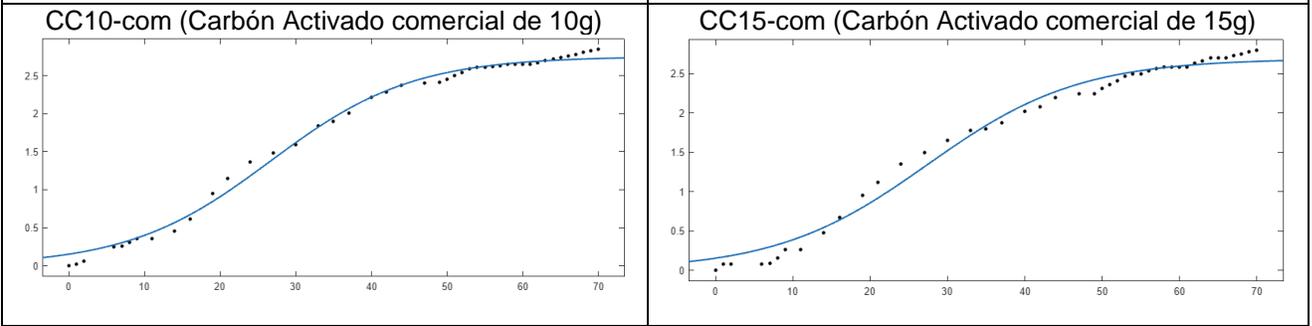
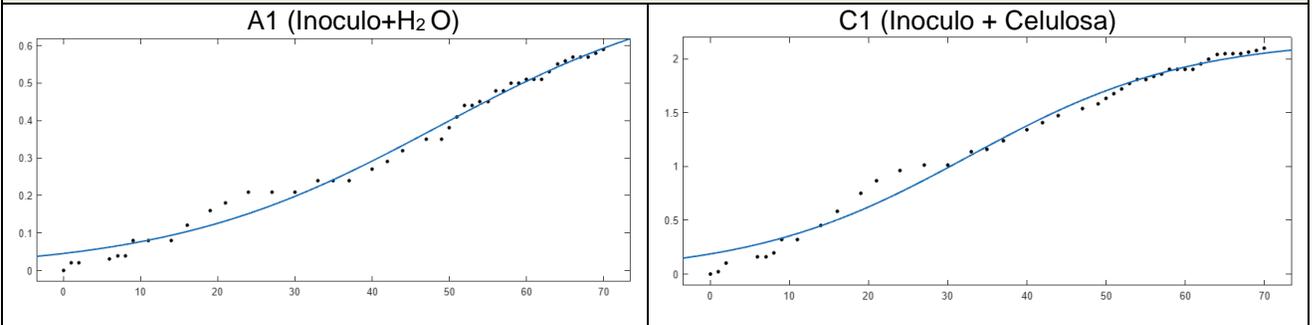
Anexo B : Inspección visual M1

Figura 0-1 Anexo M1.1 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos con las dosis 10,15 y 20g/L CA comercial



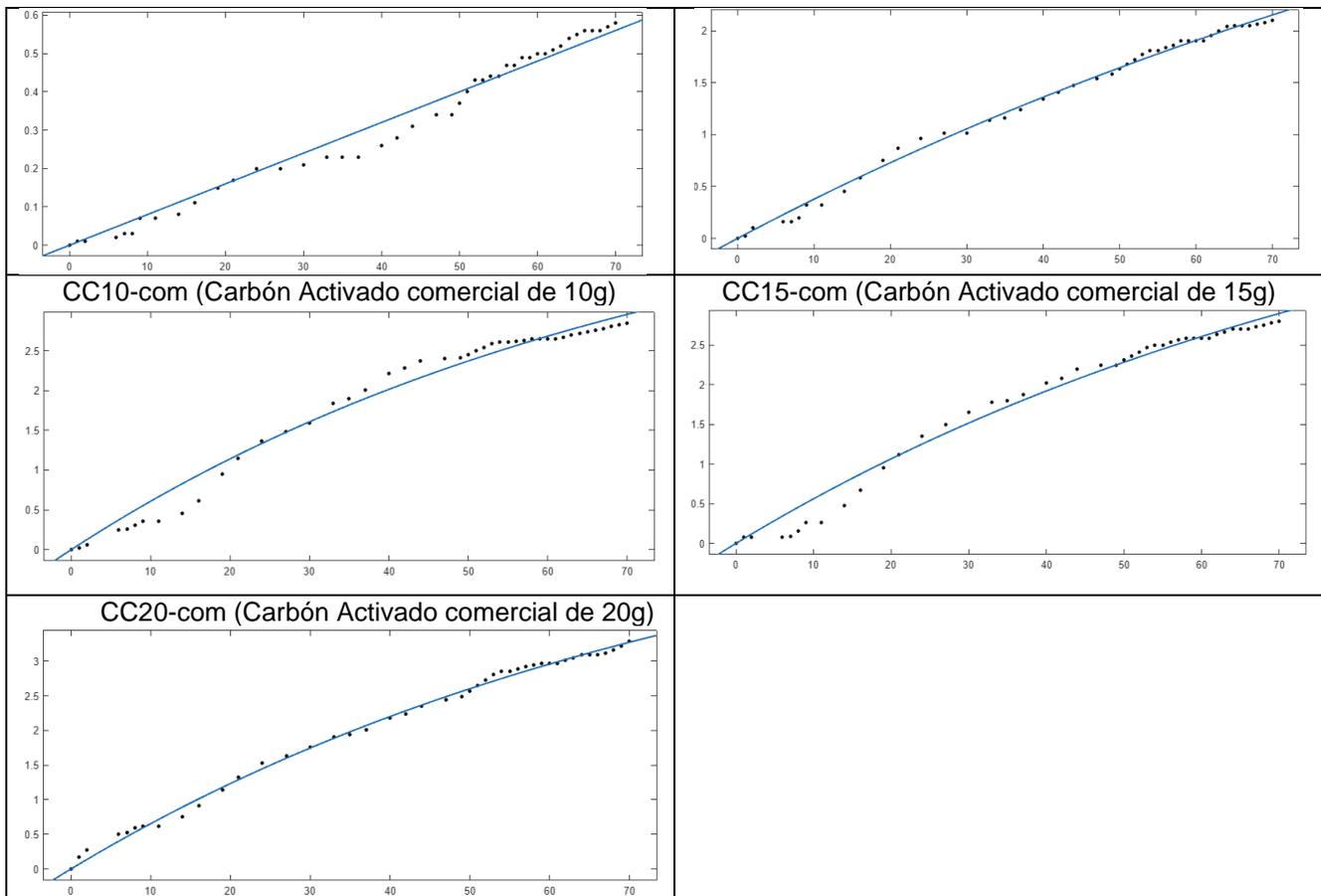


Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Modelo Logístico



Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Roediger

<p align="center">A1 (Inoculo+H₂O)</p>	<p align="center">C1 (Inoculo + Celulosa)</p>
---	---



Anexo C: Parámetros cinéticos Montaje 2

Tabla 0-1 Anexo M2 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 25,30,35g/L CAcomercial y celulosa

Agua e Inóculo (A2)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
Go (m ³ /Kg SV)	0.68	1.16	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.014	0.01	
Lambda (d)	13.77	12.94	
Kh (d ⁻¹)			0.00

R ²	0.98	0.98	0.94
RCM	0.02	0.02	0.04

Celulosa e Inóculo (C2)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	1.19	4.50
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.03	0.06	
Lambda (d)	0.81	14.95	
Kh (d ⁻¹)			2.4572e-05
R ²	0.61	0.99	0.90
RCM	0.47	0.08	0.24

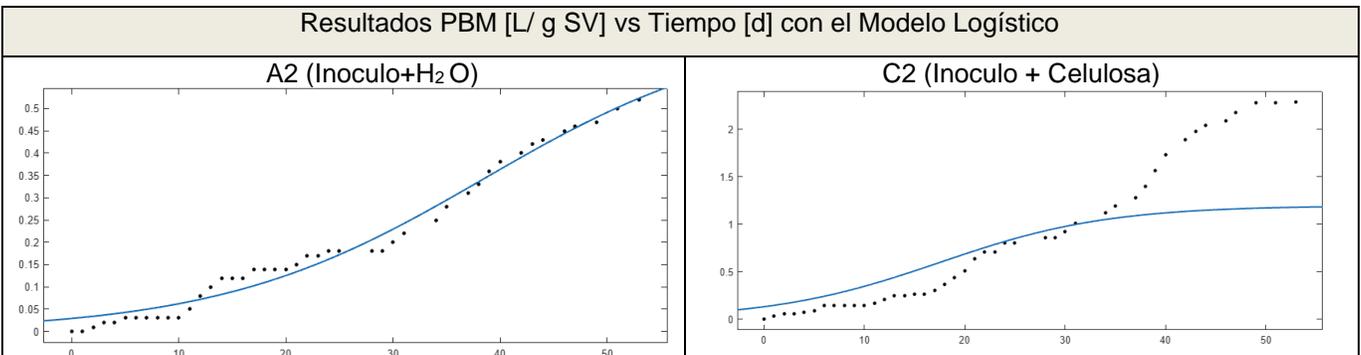
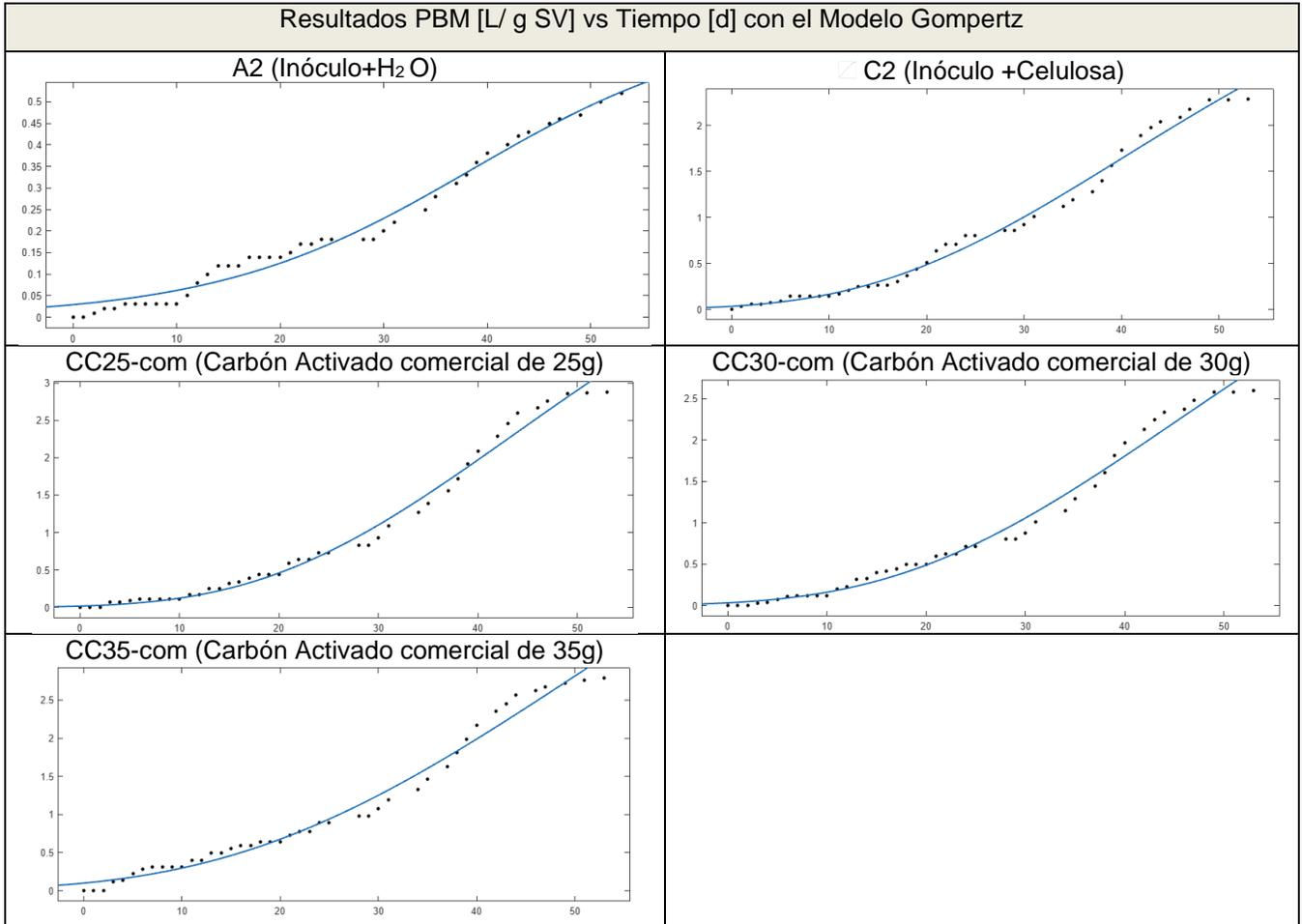
Celulosa y CC25- com			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	1.36	6.26
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.04	0.09	
Lambda (d)	0.73	19.01	
Kh (d ⁻¹)			3.6438e-05
R ²	0.53	0.99	0.85
RCM	0.66	0.11	0.38

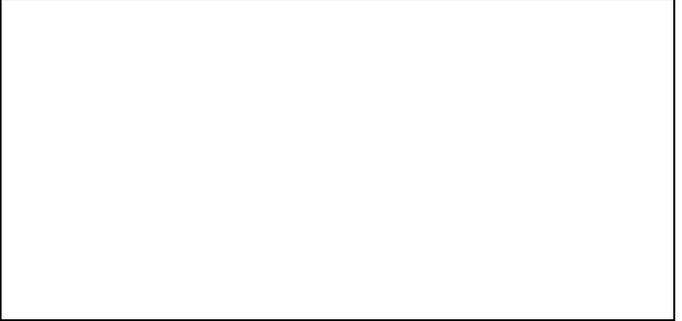
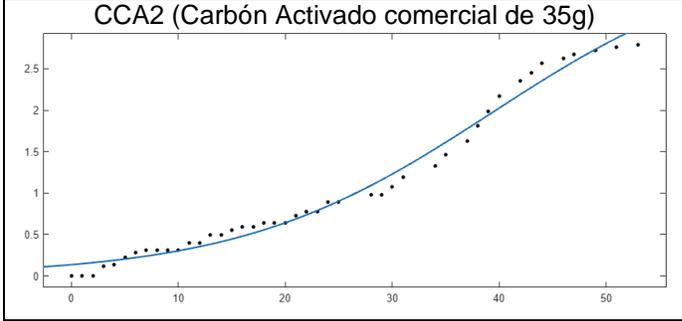
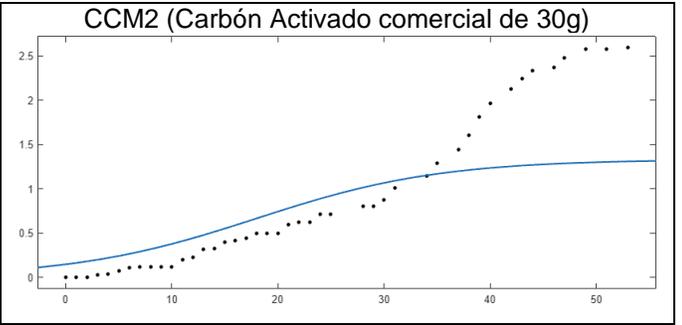
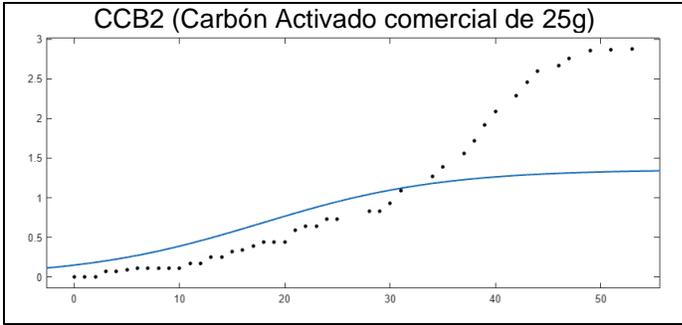
Celulosa y CC30-com (CCM2)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	1.33	6.05
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.04	0.08	
Lambda (d)	0.76	17.88	
Kh (d ⁻¹)			3.8497e-05
R ²	0.59	0.98	0.88
RCM	0.55	0.11	0.30

Celulosa y Carbón Activado comercial de 35g (CCA2)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	3.94	8.00
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.08	0.08	
Lambda (d)	15.72	16.70	
Kh (d ⁻¹)			2.1655e-05
R ²	0.98	0.98	0.92
RCM	0.11	0.12	0.26

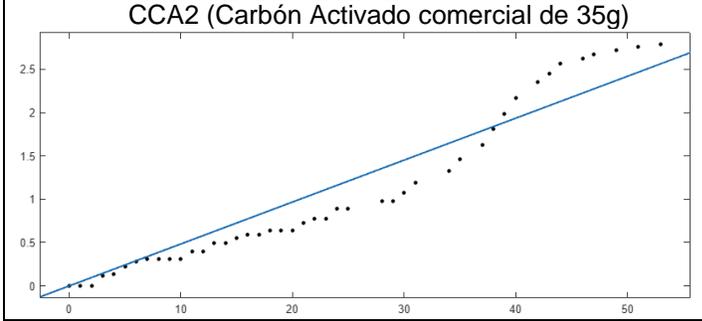
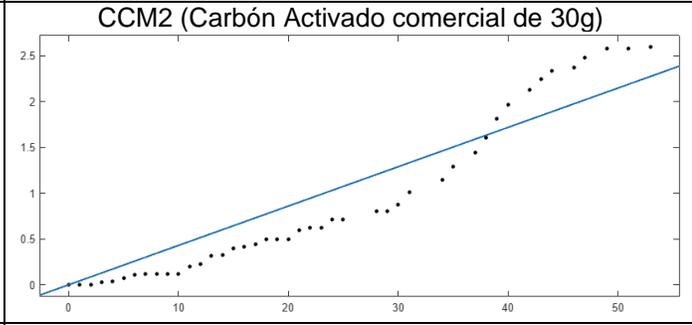
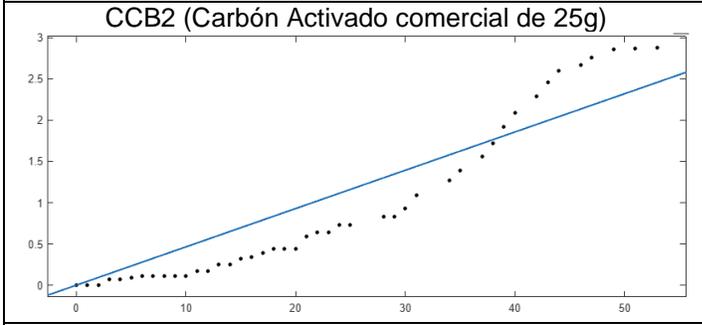
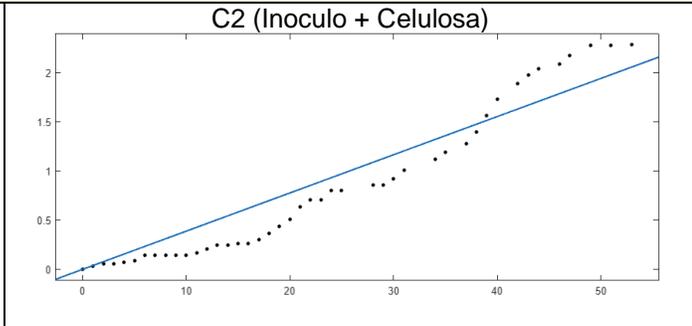
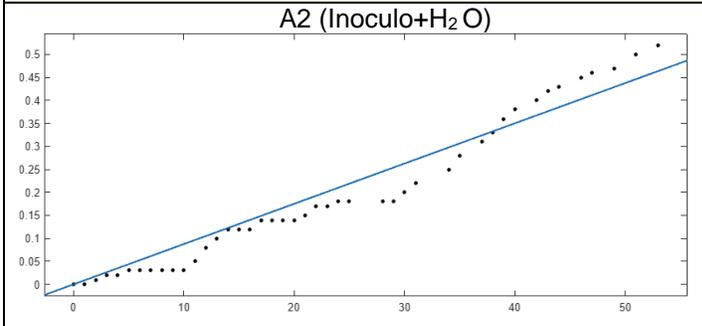
Anexo D: Inspección visual M2

Figura 0-1 Anexo M2.2 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Gompertz y Logístico para tratamientos con las dosis 25,30 y 35g/L CA comercial





Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Roediger



Anexo E: Parámetros cinéticos Montaje 3

Tabla 0-1 Anexo M3 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20,25g/L CA-BC

Agua e inóculo (A3)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
Go (m ³ /Kg SV)	0.00	0.00	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.00	0.17	
Lambda (d)	0.29	0.68	
Kh (d ⁻¹)			0.0001
R ²	1.18	0.18	0.84
RCM	0.04	0.04	0.011

Celulosa e inóculo (C3)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
Go (m ³ /Kg SV)	0.00	0.00	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.00	0.07	
Lambda (d)	0.26	0.72	
Kh (d ⁻¹)			0.0001
R ²	1.00	1.00	0.79
RCM	0.05	0.05	0.017

Celulosa y 10CAc			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
Go (m ³ /Kg SV)	0.01	0.02	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.02	0.06	
Lambda (d)	8.16	8.18	
Kh (d ⁻¹)			0.000
R ²	0.99	0.99	0.81
RCM	0.004	0.004	0.23

Celulosa y 15CAc			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger

Go (m ³ /Kg SV)	0.02	0.02	
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.15	0.13	
Lambda (d)	9.22	8.20	
Kh (d ⁻¹)			0.000
R ²	0.99	0.99	0.86
RCM	0.004	0.003	0.027

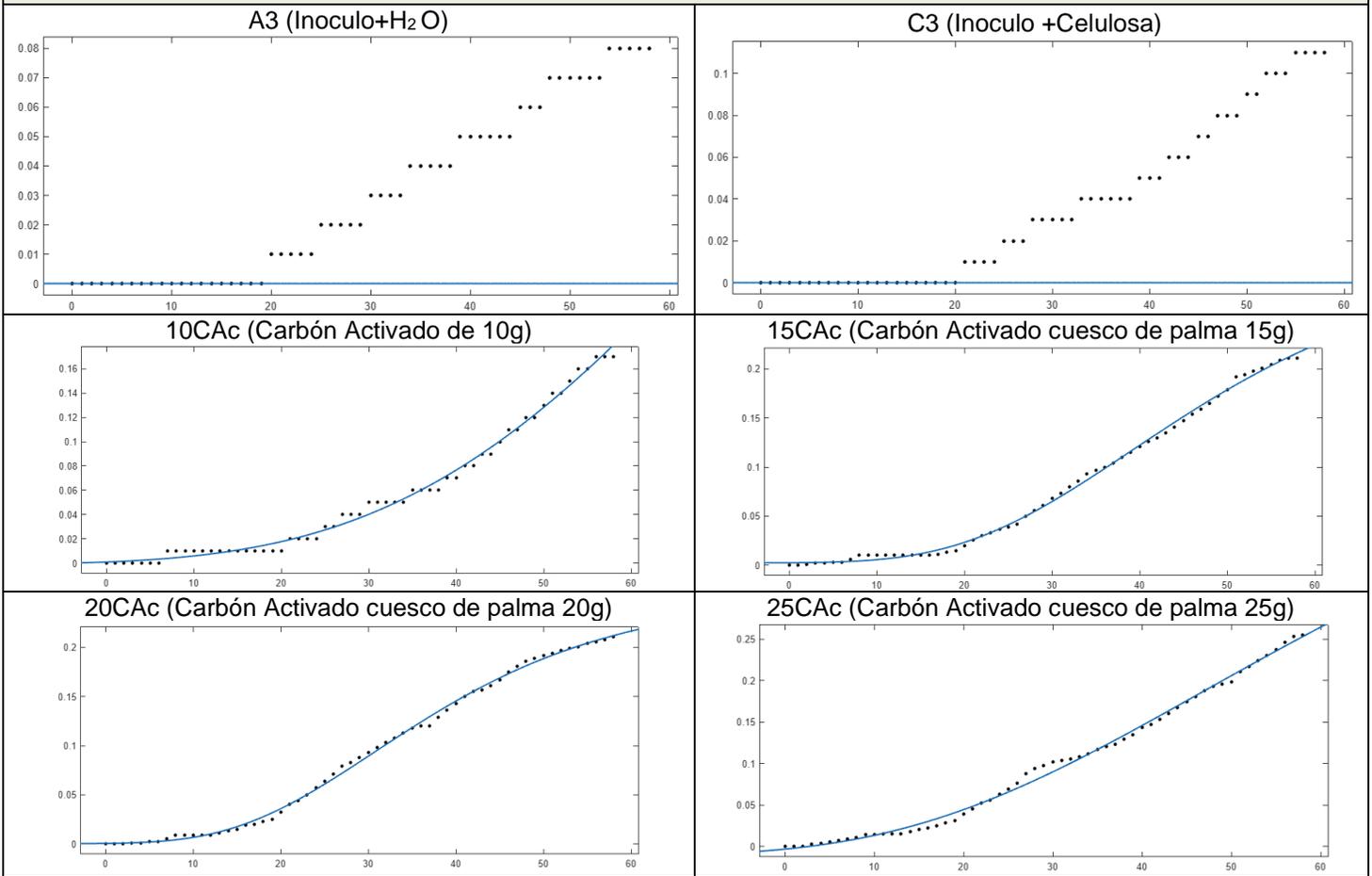
Celulosa y 20CAc			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.04	0.03
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.15	0.13	
Lambda (d)	9.25	9.18	
Kh (d ⁻¹)			0.000
R ²	0.99	1.00	0.92
RCM	0.005	0.05	0.021

Celulosa y 25CAc			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.06	0.07
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.19	0.20	
Lambda (d)	6.33	5.35	
Kh (d ⁻¹)			0.000
R ²	0.99	0.99	0.92
RCM	0.008	0.005	0.023

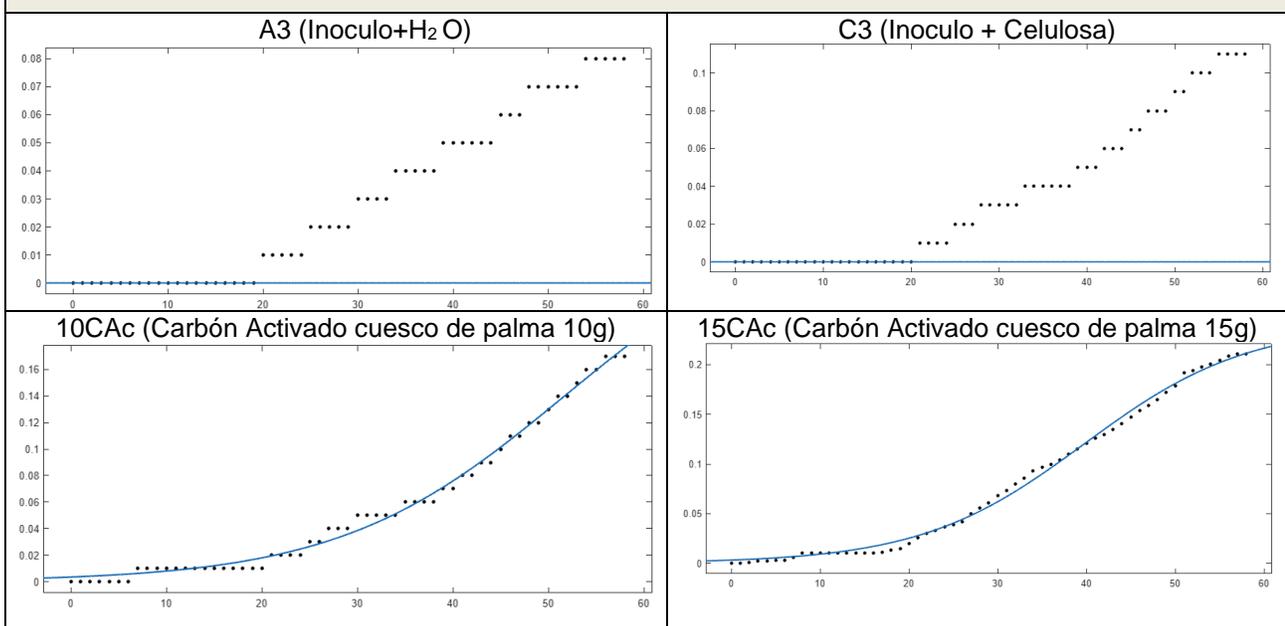
Anexo F: Inspección visual M3

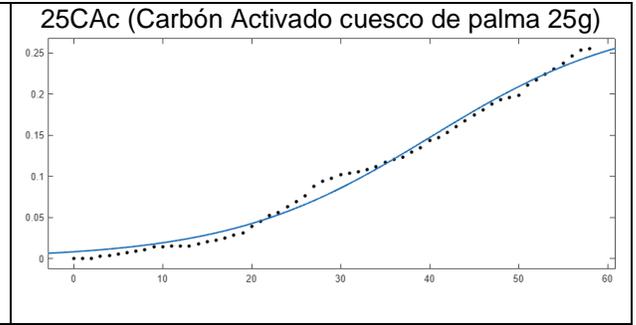
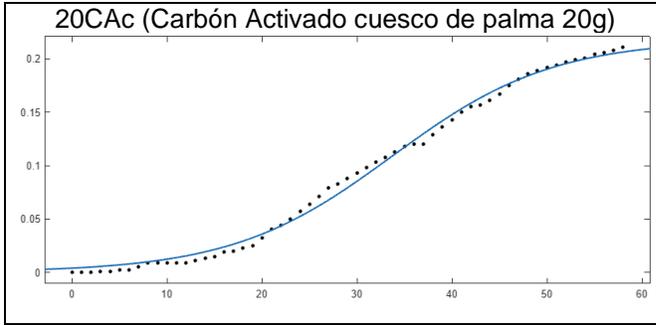
Figura 0-1 Anexo M3.3 Inspección visual de los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos de los modelos Gompertz y Logístico para tratamientos 10,15,20,25g/L con celulosa y CA cuesco de palma

Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Modelo Gompertz

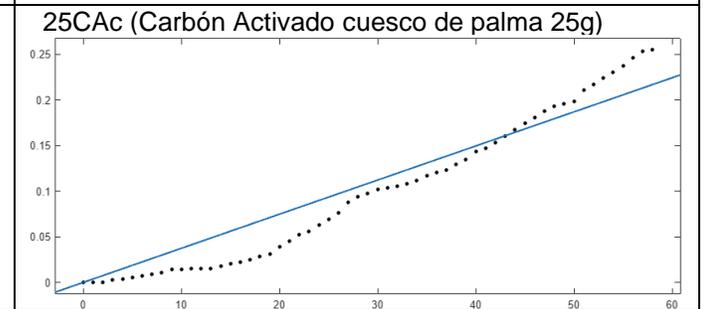
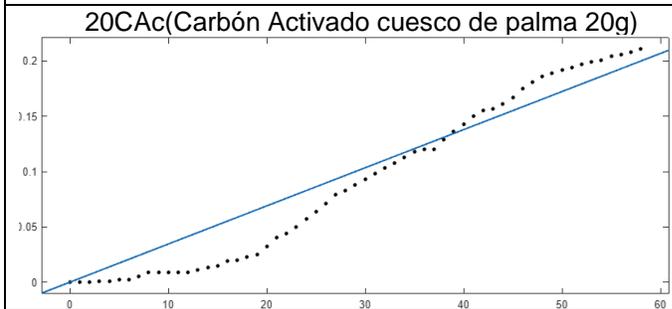
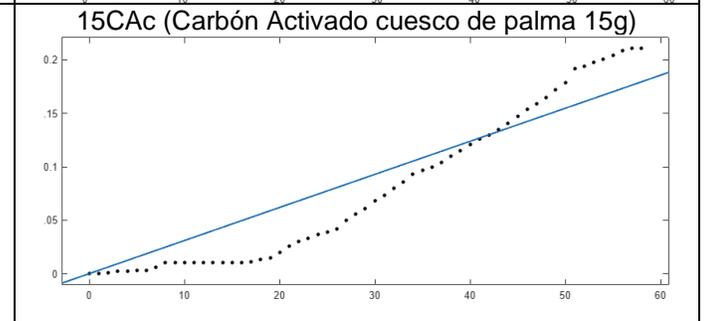
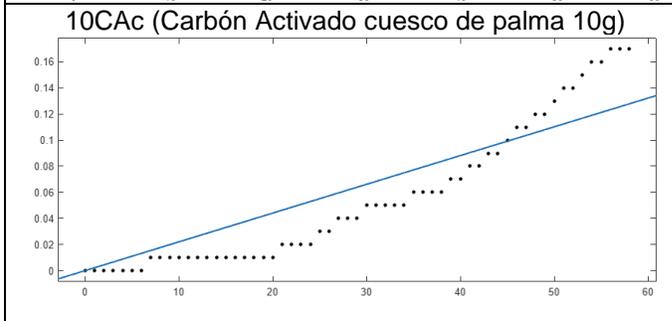
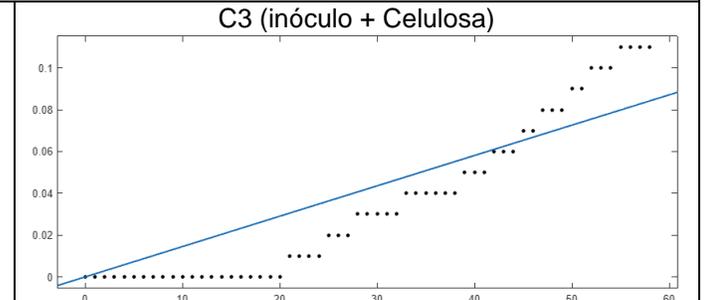
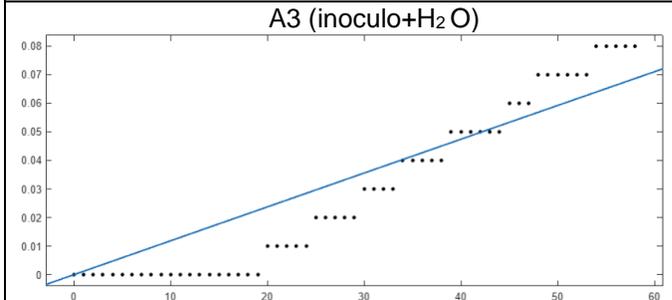


Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Modelo Logístico





Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Roediger



Anexo G: Parámetros cinéticos Montaje 4

Tabla 0-1 Anexo M4 Resultados del PBM mediante los parámetros cinéticos correspondientes a la Función Modificado de Gompertz y Logístico para tratamientos 25 g/L CA comercial y 25g/L CA cuesco de palma utilizando en ambos casos residuos orgánicos

Agua e Inóculo (A4)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.00	0.03
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	-0.78	-0.80	
Lambda (d)	0.73	0.33	
Kh (d ⁻¹)			0.00
R ²	-1.29	-1.29	0.86
RCM	0.04	0.04	0.01

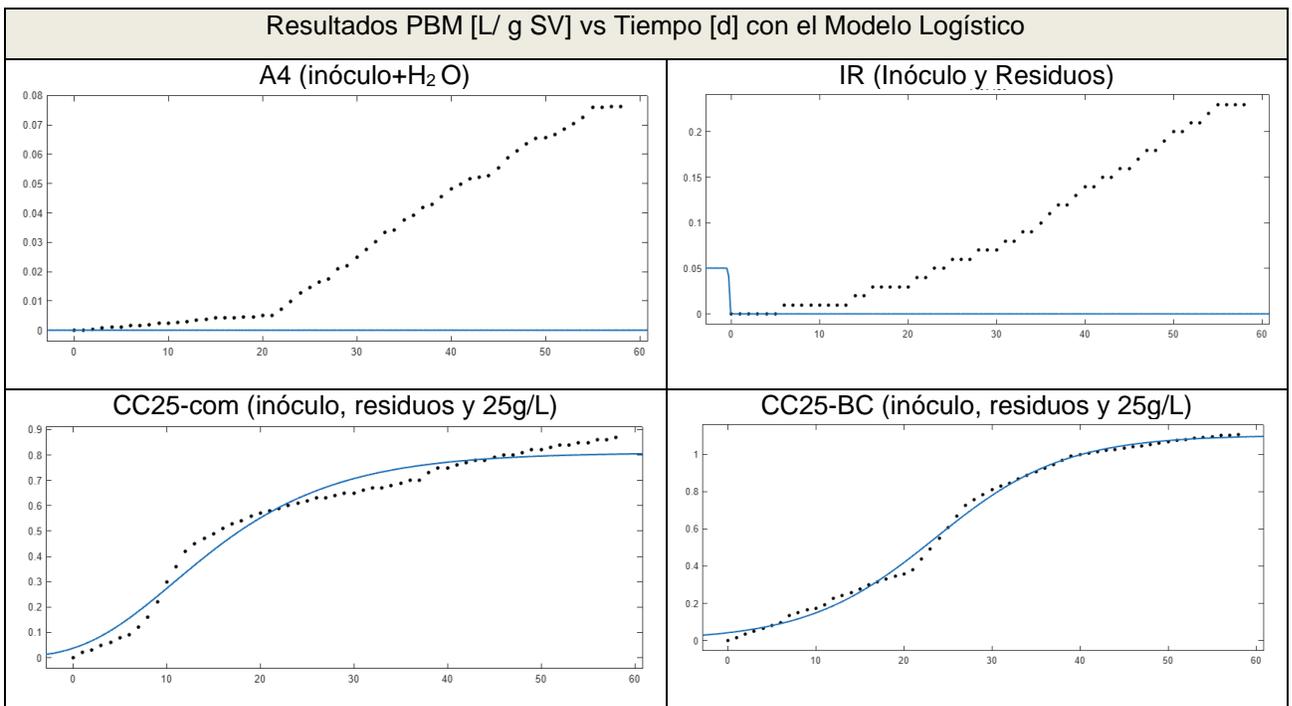
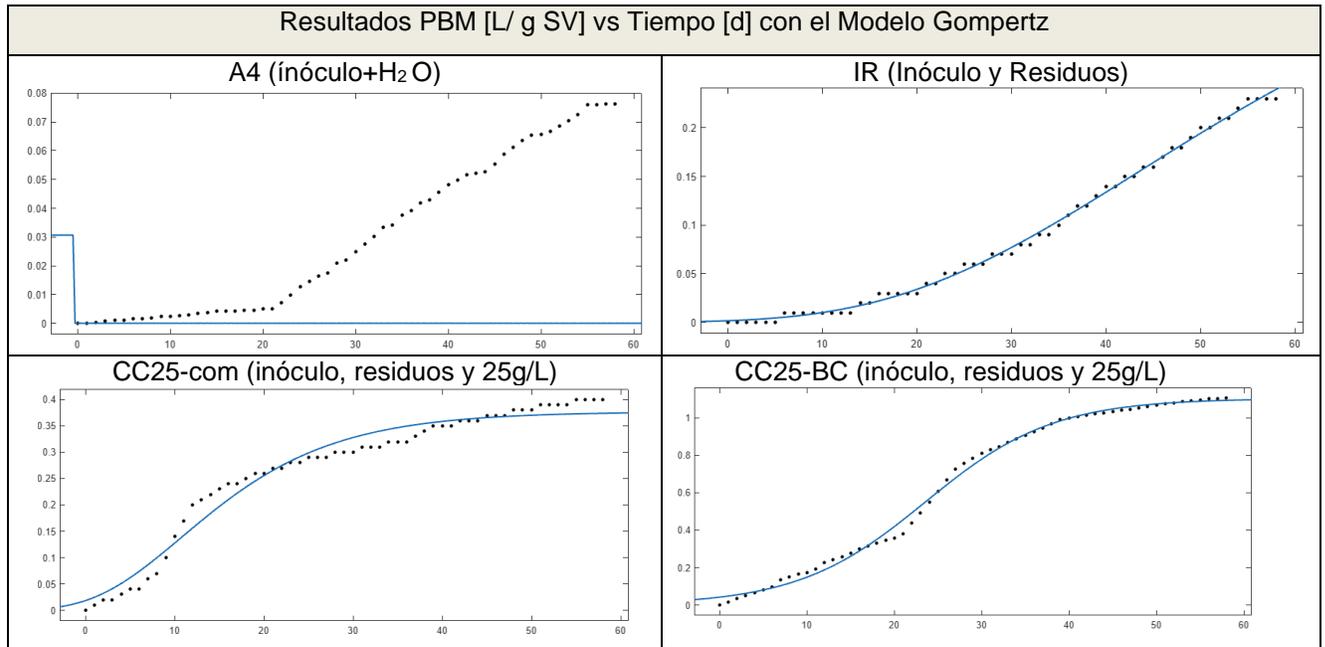
Residuos y Agua (RH)			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.05	0.42
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	-0.33	0.06	
Lambda (d)	0.14	18.07	
Kh (d ⁻¹)			0.00
R ²	-1.48	0.99	0.89
RCM	0.12	0.00	0.02

Residuos y CC25-BC			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	1.10	1.18
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.04	0.03	
Lambda (d)	8.97	7.09	
Kh (d ⁻¹)			0.01
R ²	0.99	0.99	0.99
RCM	0.02	0.04	0.08

Residuos y CC25-com			
Parámetros cinéticos	Modelo Logístico	Modelo Gompertz	Modelo Roediger
	Go (m ³ /Kg SV)	0.79	0.81
Rmáx (m ³ /Kg SV* d)	0.03	0.03	
Lambda (d)	1.21	1.16	
Kh (d ⁻¹)			0.04
R ²	0.95	0.97	0.97
RCM	0.06	0.04	0.04

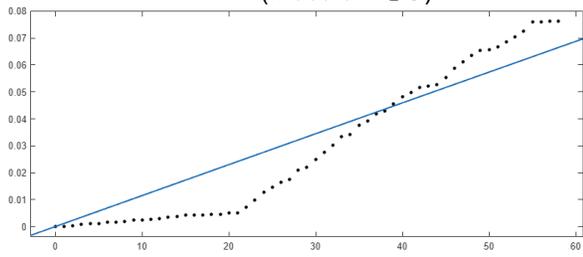
Anexo H: Inspección visual M4

Figura 0-1 Anexo M4.4 Inspección visual de los parámetros cinéticos con los modelos Gompertz y Logístico A4 (inoculo y agua), IR4 (inoculo y residuos orgánicos), 25CA cm (inoculo, residuos y 25g/L CA comercial) y 25 CAcp (inoculo, residuos y 25g/L CAcuesco)

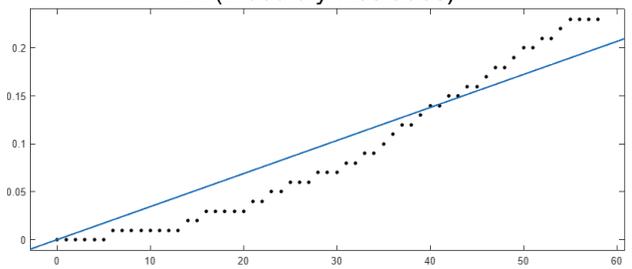


Resultados PBM [L/ g SV] vs Tiempo [d] con el Roediger

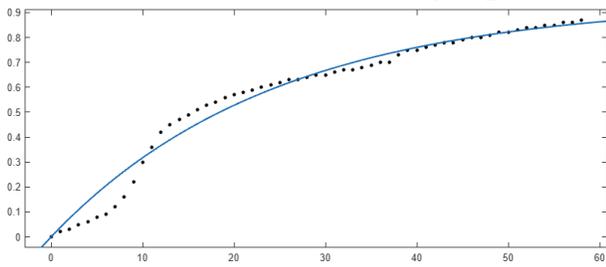
A4 (inóculo+H₂O)



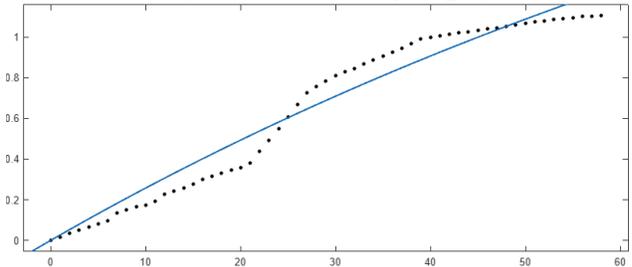
IR (Inóculo y Residuos)



CC25-com (inóculo, residuos y 25g/L)



CC25-BC (inóculo, residuos y 25g/L)



Anexo I: Esquema de reactores batch utilizados para determinar el PBM



A. Reactores batch de 1.1 L

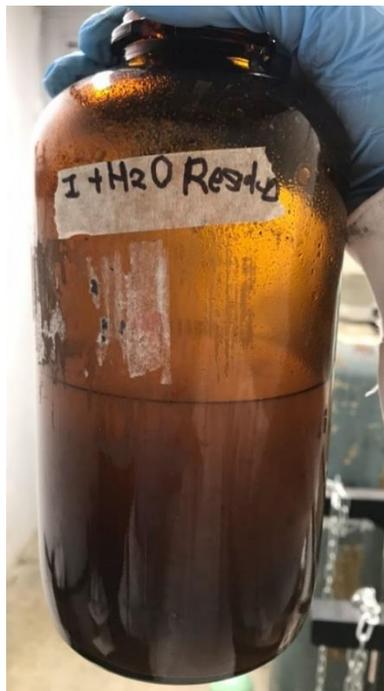
B. Gasificación de biogás

25CA comercial + Residuos Día 7

Anexo J: Reactor batch inoculado con 25g CA cuesco de palma y residuos orgánicos de alimentos.



a. A los 34 días del ensayo de PBM



a. A los 34 días del ensayo de PBM

Anexo K: Reactor batch inoculado con 10, 15, 20 CA cuesco de palma y celulosa.



a. A los 20 días del ensayo de PBM

Anexo L: Reactor batch inoculado con 15, 20, 25 CA cuesco de palma y celulosa

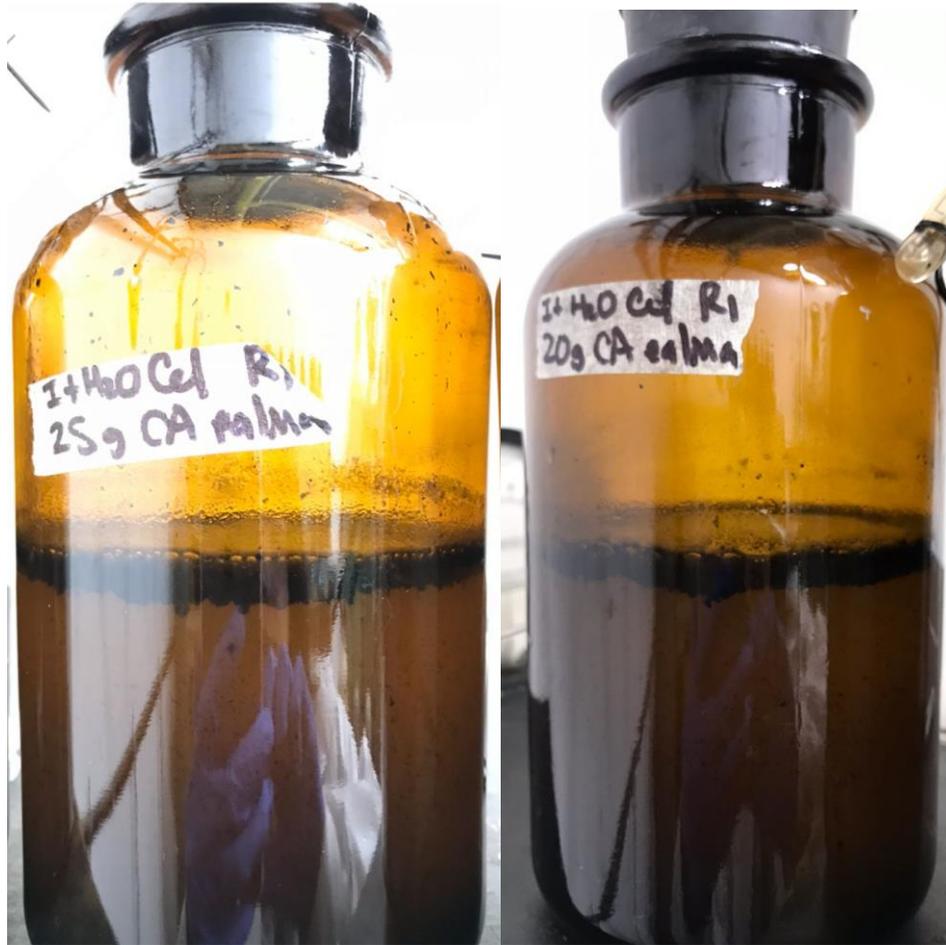


a. A los 20 días del ensayo de PBM



a. Día 20 b. Día 34

Anexo M: Reactor batch inoculado con 20 y 25 g CA cuesco de palma con celulosa



Día 44 del ensayo de PBM

4. Bibliografía

Chejne, J.F. (24-26 de noviembre de 2018). Bioeconomy a living and biodiverse Colombia. [Discurso principal]. Seminario Virtual ASPA.

A.Andrade, A,Restrepo y J.E Tibaquirá. “Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia”, Entre Ciencia e Ingeniería,vol. 12, , no. Primer semestre de 2018, p. 40- 47, doi: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3701>.

Plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) 2019. “Informe de la caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos”. [Online]. Available: medellin.gov.co.

UPME. (2018). Estrategias y planes indicativos para impulsar la bionergía en Colombia. *2do Congreso Nacional de Bionergía*

Medellín, C. R. S. (2019). Informe de la caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos. Sitioweb:[https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/MedioAmbiente/Programas/Shared% 20Content/Documentos/2019/Informe](https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/MedioAmbiente/Programas/Shared%20Content/Documentos/2019/Informe).

M. T. V. Moreno, FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás,” Proy. CHI/00/G32,p.120,2011,[Online].Available:<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.

Abbasi , S.M. Tauseef and S.A. Abbasi , “Anaerobic digestion for global warming control and energy generation” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol16, p 3228-3242, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>.

Dobre, F. Nicolae and F. Matei, “Main factors affecting biogas production - an overview”. Romanian Biotechnological Letters, Vol.19, No3, 2014, [Online]. Available: (erepository.org).

Cooperación Alemana de Biogás. (2018) “Digestato como fertilizantes”, Fachverband Biogas, [Online]. Available:[Digestato como fertilizante.pdf](#).

GIZ .Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable, “Biowaste to Biogas”, Fachverband Biogas know how_1, [Online]. Available: biowaste-to-biogas.pdf.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). “Norma Técnica Ntc Colombiana Calidad Del Agua. Determinación Del Contenido De Sólidos E: Water Quality. Determination Of Solid Content Correspondencia. Bogotá, D.C. Available: ipublishcentral.com.

Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). “Perspectives of Biochemical Methane Potential-BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes”. *Revista Ion*, 29(1), 95.

Fanghua, L., Rotaru, A. E., Shrestha, P., Malvankar, K.P & Lovley, D. R. (2012). “Promoting direct interspecies electron transfer with activated carbon ”. *Energy Environ.5* (8982).

Sajib, B. and Bipro, R. (2017). Advances towards understanding and engineering direct interspecies electron transfer in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 244 (698-707).

Suyun, X., Runqi, H., Yuchen, Z., Chuanqiu, H., and Hongbo, L (2018). Differentiated stimulating effects of activated carbon on methanogenic degradation of acetate, propionate and butyrate. *ELSEVIER*.

Ryue, J., Lin, L., Liu, Y., Lu, W., McCartney, D., & Dhar, B. R. (2019). Comparative effects of GAC addition on methane productivity and microbial community in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of food waste. *Biochemical engineering journal*, 146, 79-87

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water science and technology*, 59(5), 927-934.

Angelidaki, I., Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Astals, S., Baier, U., & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522.

Sánchez, J.M “Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en el barrio Moravia - Medellín,” Universidad de Antioquia, 2019.

Morales, P. L. (2018) “Evaluación experimental del potencial de producción de biogás a partir de aguas residuales procedentes del Camal Metropolitano de Quito”. Available: Bachelor's thesis.

Moharir S., Bondre, A., Vaidya, S., Patankar, P., Kanaskar, Y., & Karne, H. (2020). “Comparative analysis of the amount of biogas produced by different cultures using the modified Gompertz model and Logistic model”. *European Journal of Sustainable Development Research*, 4(4), em0141.

Corredor S. A., (2014). “Preparación y caracterización de carbón activado granular obtenido a partir de cuesco de palma africana (*elaeis guineensis*) para la adsorción de CO₂”. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, A., W. Klose, and S. Rincón. (2010) “ Carbón activado de cuesco de palma: Estudio de termogravimetría y estructura”. Kassel University Press

Valencia, J.P., (2014).” Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio”. Universidad Nacional de Colombia

Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*. CRC press.

Mcdougall, G.J., (1991). “The physical nature and manufacture of activated carbon”. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 91 (4): p. 109-120.

Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H., & Alam, S. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner engineering and technology*, 6, 100382.

Garche, J., (2009). "Encyclopedia of Electrochemical Power Sources". Part I. Vol. 1.

Rashidi, N.A. and S. Yusup, (2017). "Revisión sobre avances tecnológicos recientes en la producción de carbón activado a partir de residuos de la palma de aceite". *Revista Palmas*, 38: p. 86-118.

García, J.A.; Cárdenas, M.M.; Yáñez, E.E.; (2010). "Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia". Available: *Revista Palmas Volumen 31, No 2. Pág. (41-48)*.

Pitto, L. D., & Carvajal, A. D. (2017). "Monografía de estudio sobre los impactos ambientales que generan el cultivo y producción de palma de aceite africana". (*Elaeis Guineensis jacq.*) en el departamento del Meta.

Cordoba, M. F. (2023). "Evaluación del efecto de la torrefacción y la pirólisis lenta en el desarrollo de porosidad de carbones activados especiales obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica". Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia.

Villanueva, D. M. (2019). "Producción de carbón activado a partir de hueso de palma de aceite para la remoción de paraquat en solución acuosa. Universidad Nacional de Colombia.

Marsh, H. and F. R Reinoso (2006) *Activated Carbon: Elsevier Science & Technology Books*

Menéndez D.J. and I. Gullón. M,(2006) "Types of carbon adsorbents and their production. *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*". 7 (4): p. 1-47.

Davidraj, J. Liang, B., Fu, R., Luo, G., Meruvu, H., Yang, S and Fei, Q. (2020) "Supplementing granular activated carbon for enhanced methane production in anaerobic co-digestion of postconsumer substrates." *Biomass and Bioenergy* 136 (2020): 105543

Casallas O.M ., B.S. Meneses., Urueña A.R., Marmolejo L. F., & Lozada T. (2021). "Techniques for quantifying methane production potential in the anaerobic digestion process". *Waste and Biomass Valorization*, 1-18.

C.G Tojo, G., Moscoviz, R., Ruiz, D., Santa-Catalina, G., Trably, E., Rouez, M., & Escudié, R. (2018). "Addition of granular activated carbon and trace elements to favor volatile fatty acid consumption during anaerobic digestion of food waste". *Bioresource technology*, 260, 157- 168.

González G. P. (2018). "Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1393-1414.

Tello, G. A. (2018). "Caracterización de carbones activados de fabricación nacional para su uso en sistemas de refrigeración solar por adsorción". Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias.

J.Fernandez,(2010)."Biomasa".Energias Renovables, Fundación de la Energía Universidad de Madrid [Online]. Available:Biomasa (scribd.com).

European Comission. (2020) Optimal use of biogas from waste streams: an assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond. [Online].Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ce_delft_3g84_biogas_beyond_2020_final_report.pdf

Jiang, Q., Liu, H., Zhang, Y., Cui, M. H., Fu, B., & Liu, H. B. (2021). Insight into sludge anaerobic digestion with granular activated carbon addition: methanogenic acceleration and methane reduction relief. *Bioresource Technology*, 319, 124131.

Chunhuahe, H., Liu, T., Ou, H., Yuan, S., Hu, Z., & Wang, W. (2021). Coupling granular activated carbon and exogenous hydrogen to enhance anaerobic digestion of phenol via predominant syntrophic acetate oxidation and hydrogenotrophic methanogenesis pathway. *Bioresource Technology*, 323, 124576.

Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X., Zhao, Z., 2017. Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition. *J. Clean. Prod.* 149, 1101–1108.

Yu, N., Guo, B., Zhang, Y., Zhang, L., Zhou, Y., Liu, Y., 2020b. Self-fluidized GAC-amended UASB reactor for enhanced methane production. *Chem. Eng. J.* 127652.

Zhang, J., Zhang, R., Wang, H., Yang, K., 2020a. Direct interspecies electron transfer stimulated by granular activated carbon enhances anaerobic methanation efficiency from typical kitchen waste lipid-rapeseed oil. *Sci. Total Environ.* 704, 135282.

Arango, O. & Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 7(2), 24-31.

J. A Samaniego., y P.A Sandoval., (2013). Usos potenciales de los ácidos grasos volátiles en suelo, agua y aire. *Terra Latinoamericana*, 31(2), 155-163.

S. Shouvik, B. Bikram , J.H Hwang, S. Sayed , K.C Pradip and H.J Byong. Review Microbial Symbiosis: A Network towards Biomethanation. *CellPress Riviews, Trends in Microbiology* Volume 28, Issue 12, December 2020, Pages 968-984.

Wang, Y., Y. Zhang, J. Wang, and L. Meng. 2009. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Biom. Bioener.* 33: 848-853.

Xiao, L., Liu, J., Kumar, P. S., Zhou, M., Yu, J., & Lichtfouse, E. (2022). Enhanced methane production by granular activated carbon: A review. *Fuel*, 320, 123903.

Zhang, Q., Yang, Y., Hou, L. A., Zhu, H., Zhang, Y., Pu, J., & Li, Y. (2023). Recent advances of carbon-based additives in anaerobic digestion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113536.

Borja, R and Rincón, B. Biogas Production. *Comprehensive Biotechnology*, Volume 2, 2011, Pages 785-798

Education department Open Textbook Pilot. Book: Microbiology (Boundless). Chapter 2: Hydrogen Bonding: Covalent Bonds and Other Bonds and Interaction. Available: <https://bio.libretexts.org/>

Loveday, O and Echeverria, J. Methyl Groups as Hydrogen Bond Acceptors via Their sp^3 Carbon Atoms Cryst. (2021) 21, 10, 5961–5966. Publication Date: September 13, 2021. Available: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acs.cgd.1c00853>.