

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y DE LA
OPERACIÓN DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO**

LUISA FERNANDA MORALES BUITRAGO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2020**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y DE LA
OPERACIÓN DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO**

LUISA FERNANDA MORALES BUITRAGO

**Proyecto integral de grado para optar por el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

Director

**HÉCTOR JAVIER LUNA WANDURRAGA
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2020

Nota de aceptación:

Ing. Iván Ramírez Marín

BOGOTÁ D.C., agosto de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMAN

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente, no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A mi madre, a mis tiuchis Claudia y Nana, por ser un apoyo incondicional a nivel emocional y económico, por tener palabras de aliento cada vez que intenté rendirme, por aconsejarme y regañarme cada vez que lo necesité, por ser más que mi familia, convirtiéndose en mis amigas y mis confidentes, este logro es un homenaje a la educación y amor impartida por ustedes, fueron, son y serán mi ejemplo a seguir.

Luisa Fernanda Morales Buitrago

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi madre por su apoyo incondicional, por hacer de mí quien soy, por enseñarme valores y principios, por la educación y el amor, por demostrármelo a cada momento y por creer en mí sin importar nada, a mi padre, a mi abuelita Fanny, a mi abuelita Nelly, a Luz, a Juli y a toda mi familia, por ser mi pilar, por ser un apoyo en todo momento y siempre tener una palabra de ánimo para ayudarme a salir adelante frente a cualquier adversidad. A mi abuelo materno QEPD por haber sido mi apoyo a lo largo de mi vida y en mi carrera universitaria, a todas las personas especiales y a mis amigos que me acompañaron en esta etapa tan importante de mi vida, aportando día a día a mi formación tanto profesional como personal.

Agradecer a la Fundación Universidad de América y a cada docente por enriquecerme de conocimiento.

Al grupo GRESIA de la Universidad Antonio Nariño, por permitirme llevar a cabo mi proyecto de grado, por brindarme el apoyo y los conocimientos necesarios.

Por último, agradecer a mi director de tesis, el profesor Héctor Luna, quien

me brindo acompañamiento a lo largo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
GLOSARIO	17
OBJETIVOS	23
1. MARCO TEÓRICO	24
1.1 BIOMASA	24
1.2 BIOMASA LIGNOCELULÓSICA	25
1.2.1 Materiales lignocelulósicos.	26
1.2.1.1 Pretratamiento mecánico.	27
1.2.1.2 Pretratamiento térmico.	27
1.2.1.3 Pretratamiento con vapor de agua.	27
1.2.1.4 Pretratamiento con agua caliente.	27
1.2.1.5 Pretratamiento ácido.	27
1.2.1.6 Pretratamiento alcalino.	28
1.2.2 Celulosa.	28
1.2.3 Hemicelulosa.	29
1.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA	30
1.3.1 Hidrólisis.	33
1.3.2 Acidogénesis.	33
1.3.3 Acetogénesis.	33
1.3.4 Metanogénesis.	34
1.4 BIOGÁS	34
1.4 TIPO DE REACTORES	35
1.4.1 Reactor escalonado metanogénico (REM).	36
1.4.2 Reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR).	38
1.5 LODO GRANULAR	39
1.6 ENSAYO DE TRAZADORES	40
2. OE 1 DETERMINAR LA HIDRODINÁMICA DE UN BIORREACTOR HIBRIDO EMPLEANDO EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES.	42
2.1 METODOLOGÍA OE 1	42
2.1.1 Selección de condiciones de operación.	42
2.1.2 Construcción del biorreactor	44
2.1.3 Ensamblaje y acople	45

2.1.4 Verificación de fugas.	46
2.1.5 Ensayo de trazadores	47
2.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS OE1	49
3. OE 2 IDENTIFICAR LA INFLUENCIA DEL LODO GRANULAR Y DEL LECHO ESTRUCTURADO EN EL TRAZADOR SELECCIONADO	56
3.1 METODOLOGÍA OE 2	56
3.1.2 Ensayo de adsorción del lecho estructurado.	56
3.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ADSORCIÓN DEL LECHO ESTRUCTURADO	57
3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ADSORCIÓN DEL LODO GRANULAR	59
4. OE 3 CARACTERIZAR LA BIOMASA DENTRO DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO, DURANTE LA OPERACIÓN	61
4.1 METODOLOGÍA OE 3	61
4.1.1 Inoculación artificial.	61
4.1.2 Operación del biorreactor.	61
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL BIORREACTOR	62
4.2.1 Medición pH.	62
4.2.2 Medición caudal.	65
4.2.3 Medición temperatura.	66
4.2.4 Medición DQO.	67
4.2.5 Sólidos totales, fijos y volátiles	72
4.2.5.1 Sólidos totales, fijos y volátiles del efluente.	72
4.2.5.2 Sólidos totales, fijos y volátiles del lecho estructurado	74
5. CONCLUSIONES	77
6. RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Generalidades del Biogás	34
Tabla 2. Ventajas y desventajas del RME	38
Tabla 3. Resultados ensayo de trazadores	52
Tabla 4. Parámetros del ensayo de trazadores	53
Tabla 5. Macronutrientes para 6 L de alimento DQO de 4000 mg/L	61
Tabla 6. Micronutrientes para 6 L de alimento DQO de 4000 mg/L	62
Tabla 7. Datos obtenidos en la medición del caudal durante los días de operación	65
Tabla 8. Datos obtenidos en peso	73
Tabla 9. Datos obtenidos sólidos	73
Tabla 10. Datos obtenidos en peso para el lecho estructurado	74
Tabla 11. Datos obtenidos del lecho estructurado	74
Tabla 12. Promedio, mediana y desviación estándar	75
Tabla 13. Datos de biomasa obtenida en el lecho estructurado	76

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Fuentes de obtención de biomasa	25
Ilustración 2. Estructura biomasa lignocelulósica	26
Ilustración 3. Estructura de la celulosa	28
Ilustración 4. Estructura de la hemicelulosa	29
Ilustración 5. Estructura de la lignina	30
Ilustración 6. Procesos de digestión anaerobia.	31
Ilustración 7. Obtención de biogás	35
Ilustración 8. Reactor metanogénico escalonado (1 diámetro menor, 2 diámetro medio y 3 diámetro mayor)	37
Ilustración 9. Reactor ASTBR	39
Ilustración 10. Flujo en un recipiente	40
Ilustración 11. Alimentación del biorreactor	43
Ilustración 12. Biorreactor híbrido	46
Ilustración 13. Sensor de densidad óptica	47
Ilustración 14. Calibración del sensor con agua y trazador verde	48
Ilustración 15. Curva E y curva F	55
Ilustración 16. Ensayo de adsorción del lecho estructurado (1 dilución menor, 2 dilución media y 3 dilución mayor)	56
Ilustración 17. Ensayo de adsorción del lodo granular (1 dilución menor, 2 dilución media y 3 dilución mayor)	57
Ilustración 18. Ensayo de adsorción de trazadores (Cl y Li) con Lodo granular	60
Ilustración 19. pH sustrato, punto medio y del efluente	65

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulico	52
Ecuación 2. Determinación del porcentaje de remoción	68
Ecuación 3. Sólidos totales	73
Ecuación 4. Sólidos fijos	73
Ecuación 5. Sólidos volátiles	73
Ecuación 6. Cociente de sólidos volátiles y sólidos totales	74
Ecuación 7. Peso del agua	75
Ecuación 8. Sólidos fijos lecho estructurado	75
Ecuación 9. Sólidos volátiles lecho estructurado	75
Ecuación 10. Peso espuma seca más biomasa	75
Ecuación 11. Biomasa seca por cada 3 cm de espuma	75
Ecuación 12. Biomasa seca por cada cm de espuma	76
Ecuación 13. Biomasa en el soporte	76
Ecuación 14. Biomasa adherida por cada litro del reactor	76

LISTA DE DIAGRAMAS DE CAJA

	pág.
Diagrama de caja 1. pH alimento y efluente sin tener en cuenta el tipo de inoculación	64
Diagrama de caja 2. Caudal	66
Diagrama de caja 3. DQO combinada de la inoculación natural y artificial	69
Diagrama de caja 4. DQO Inoculación natural	70
Diagrama de caja 5. DQO inoculación artificial	70

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Calibración del sensor	48
Gráfica 2. Estímulo-respuesta (datos sin ajustar)	50
Gráfica 3. Estímulo-respuesta (datos ajustados)	51
Gráfica 4. Parámetros basados en Levenspiel	53
Gráfica 5. Curva F (Sumatoria del tiempo medio de retención)	54
Gráfica 6. Curva E (Espectro de densidad)	54
Gráfica 7. Ensayo de adsorción del lecho estructurado	58
Gráfica 8. Ensayo de adsorción del lodo granular	59
Gráfica 9. Datos obtenidos de pH a la entrada y salida del biorreactor	63
Gráfica 10. Temperatura durante días de operación	67
Gráfica 11. DQO inoculación natural	67
Gráfica 12. DQO inoculación artificial	68
Gráfica 13. Porcentaje de remoción	71
Gráfica 14. Sólidos totales, fijos y volátiles del efluente	72

ANEXOS

	pág.
Anexo A Ilustraciones y planos del biorreactor anaerobio híbrido	87
Anexo B Monitoreo de temperatura del biorreactor anaerobio híbrido	91
Anexo C Bomba peristáltica	92
Anexo D Cálculos del ensayo de trazadores	93
Anexo E Determinación de DQO, porcentaje de remoción y sólidos (totales, fijos y volátiles)	99

ABREVIATURAS

DQO: Demanda química de oxígeno

SST: Sólidos suspendidos totales

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

OLR: Carga orgánica

Biorreactor híbrido: Reactor escalonado de lecho estructurado

TRH: Tiempo de retención hidráulico

DA: Digestión anaerobia

RME: Reactor metanogénico escalonado

ASTBR: Reactor de lecho fijo estructurado

ST: Sólidos totales

SV: Sólidos volátiles

SF: Sólidos fijos

AGV: Ácidos grasos volátiles

LGA: Lodo granular aeróbico

BS: Biomasa en el soporte

BA: Biomasa adherida

UASB: Reactor de lecho fijo y flujo ascendente

EGSB: Reactor de lecho expandido

MBR: Biorreactor de membrana

GLOSARIO

ABSORBANCIA: es la medición de la luz que logra atravesar una solución o cuerpo absorbente en estudio.

ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES: son una cadena de ácidos de cadena corta considerados como sustancias intermedias para la producción de bioenergía.

BIOGÁS: es considerado un gas combustible que se genera por la degradación de la materia orgánica mediante la digestión anaerobia y se compone de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y trazas de ácido sulfúrico (H_2S).

BIOMASA: es la materia orgánica proveniente de la naturaleza la cual puede ser aprovechada como fuente energética renovable y es considerada como una fuente de energía sostenible.

CAUDAL: cantidad de líquido que pasa por un equipo y/o recipiente durante determinada cantidad de tiempo.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: es la medición de la cantidad de sustancias que puede ser oxidadas en una sustancia líquida que cuenta con condiciones de operación establecidas y controladas.

DIGESTIÓN ANAEROBIA: es considerado un proceso biológico mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

EFLUENTE: es el fluido que sale del biorreactor después de haber cumplido su función dentro de este.

INOCULACIÓN: se refiere a agregar algo (en este caso bacterias) a un equipo o recipiente en el cual van a crecer y se van a reproducir.

LECHO ESTRUCTURADO: es un soporte que contiene otro material en estaco polietileno de baja densidad el cual se introduce dentro de un sistema que sirve en procesos de adhesión para retener partículas sólidas.

TRAZADOR: es una sustancia líquida la cual se introduce en un sistema para determinar el comportamiento de otro fluido líquido.

RESUMEN

En el presente trabajo se tuvo como objetivo, la evaluación del comportamiento hidrodinámico y la operación de un biorreactor híbrido anaerobio, en el cual se combinan las configuraciones ASTBR y REM, señalando que con el desarrollo de esta tecnología, se logró determinar el comportamiento del fluido dentro del biorreactor, lo que me permitió verificar cuál sería la influencia de materiales como el lecho estructurado y el lodo granular dentro de este, arrojando como resultado la caracterización de la biomasa. Inicialmente se preparó agua residual sintética con una DQO de 4000 mg/L, teniendo como inóculo artificial, el lodo granular proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Postobón, se desarrolló en un reactor escalonado de lecho estructurado, continuó con un proceso de digestión anaerobia, donde se establecieron ciertos parámetros de operación como el tiempo de retención hidráulico mínimo de 36 horas, en este proyecto se obtuvo, el tiempo de retención hidráulico experimental y el tiempo de retención hidráulico teórico, con valores de 41,7 horas y 37,02 horas respectivamente, una temperatura de 35°C, un pH entre 6,5 y 7,5 y un caudal de 6,171 mL/min. Posteriormente se realizaron ensayos de adsorción del lodo granular y del lecho estructurado con el trazador de color verde, con el fin de determinar si la influencia de estos afectaba o no, el comportamiento hidrodinámico del fluido dentro del biorreactor.

Durante todo el proceso, se tuvieron monitoreados los parámetros mencionados anteriormente y otros de acuerdo a métodos estándares, como la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendido volátiles (SSV), y pH. Teniendo en cuenta la DQO tanto del alimento, como del efluente, se pudo observar que sí hubo remoción de materia orgánica, y con base en estos datos, los cuales fueron obtenidos de manera previa, se logró obtener el porcentaje de remoción de materia orgánica con inoculación natural, es decir sin adición del lodo granular, con un valor máximo de 48,07% y con inoculación artificial, adicionando el lodo granular con un valor máximo de 58,5%, por lo que fue más eficiente la inoculación artificial, todo lo mencionado anteriormente, se realizó con el objetivo de caracterizar la biomasa.

Por último, se realizó la operación del biorreactor híbrido, teniendo en cuenta la adición del lodo granular y manteniendo fijos los parámetros necesarios como pH, temperatura y caudal, para la operación adecuada del biorreactor. Inicialmente la operación se hizo con inoculación natural, es decir solo alimentando el biorreactor con el agua residual sintética durante 18 días, y posteriormente haciendo inoculación artificial con 148,1g de lodo granular durante 24 días.

Palabras claves: Biomasa lignocelulósica, biorreactor híbrido, demanda química de oxígeno, digestión anaerobia.

ABSTRACT

In the present work, the objective was to evaluate the hydrodynamic behavior and the operation of an anaerobic hybrid bioreactor in which the ASTBR and REM configurations are combined, with the development of this technology it was possible to determine the behavior of the fluid inside the bioreactor by Hence its behavior, it was verified what the influence of materials such as the structured bed and the granular mud within it was going to be, to finally carry out the characterization of the biomass. To start, made synthetic waste water with a DQO of 4000 mg/L, having an artificial inoculum the granular mud coming of the Postobón sewage treatment power plant, it has develop in a stepped structured litter reactor, continue with an anaerobic digestion process when it was establishing some operation parameters as a hydraulic retention time minimum 36 hours, in this project it was getting the experimental hydraulic retention time and the theorist hydraulic retention time with values of 41,7 hours and 37,02 hours respectively, a temperature of 35°C, a pH between 6,5 and 7,5 and a flow rate of 6,171 mL/min. Later, it was making adsorption tests of granular mud structured litter with a tracer of green color, with the final purpose decide if the influence of these affected or not the hydrodynamic behavior of the fluid inside of the bioreactor.

Moreover, throughout the all process it had superintend the parameters mentioned above and others agree standard methods as a chemical oxygen demand (DQO), total suspended solids (SST), volatile suspended solids (SSV) and pH So, taking into account, the DQO both of the food as an effluent it could see what if there was removal of organic material also in the base of this data got previously, it was achieving the percent of removal of organic material with natural inoculation, that is to say, not addition of the granular mud with a maximum value of 48,07% and with an artificial inoculation, that is to say adding the granular mud with a maximum value of 58,5%, so it was more efficient the artificial inoculation, all mentioned previously it was make with the objective characterize biomass.

To end, it was making the operation of the hybrid bioreactor taking into account the addition the granular mud and keeping permanent the necessary parameters as a pH, temperature and caudal for the correct operation of the bioreactor. Kick off, the operation it was to make with natural inoculation, that is to say, just feeding the bioreactor with the synthetic waste water during 18 days and later making artificial inoculation with 148,1 grams of granular mud during 24 days.

Keywords: Lignocellulosic biomass, hybrid bioreactor, chemical oxygen demand, anaerobic digestion.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el documento CONPES No. 3819 para el 2035, Colombia tendrá alrededor de 64 ciudades con más de 100.000 habitantes, lo que se reflejará en un aumento del 83% de la población. En el año 2014 se realizó un estudio, en el cual se estimó que se generan unos 13,8 millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos y rurales, lo que equivale a 283 kilogramos por persona. En contraste con el año 2014, se hizo una estimación para el año 2030 donde cabe señalar, que al tener un aumento en la población, se incrementará en 13,4% la generación de residuos sólidos y urbanos, lo que tendrá como consecuencia que por persona se generen 321 kilogramos al año y en general 18,74 millones de toneladas.¹ Gracias a esto, se dispone de una gran variedad de materias primas para la producción de biocombustibles, pero aun así, son muy pocas las plantas y empresas que se enfocan en la producción de estos, no obstante, basándonos en la Ley 1715 de 2014 del congreso de la república en Colombia, se tiene interés de promover y estimular las fuentes de energía no convencionales de carácter renovable², por consiguiente una de estas fuentes pueden ser los biocombustibles a partir de la biomasa, ya sea natural, residual o cultivada.

Actualmente las energías alternativas se están imponiendo para disminuir o sustituir las fuentes no renovables, uno de los tipos de energías alternativas puede ser el aprovechamiento de la biomasa para producir energía, esta puede ser categorizada en biomasa de primera generación (cultivos), de segunda generación (residuos) y tercera generación (microalgas).³ El uso de la biomasa de primera generación trae consecuencias en la seguridad alimentaria, por lo tanto, es importante tratar la de segunda generación, lo cual puede realizarse bajo el concepto de las biorrefinerías, teniendo en cuenta que es una de las más abundantes, y se encuentra en gran disponibilidad de los desechos de algunos cultivos como la caña de azúcar y la palma de aceite etc. Este tipo de biomasa es denominada lignocelulósica, la cual tiene una composición química de lignina (10-30%), celulosa (20-50%) y hemicelulosa (15-35%).⁴ Una de las alternativas para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, son los procesos biológicos, específicamente la digestión anaerobia, para lo cual es necesario separar, la lignina de la celulosa y la hemicelulosa, haciendo un pretratamiento térmico, el cual posee ventajas a nivel energético, ya que el requerimiento de energía es mucho menor, disminuyendo del mismo modo, la formación de inhibidores, todo lo anterior con el fin de obtener un

¹ Consejo nacional de política económica y social república de Colombia. Documento CONPES. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. 2016. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3819.pdf>. Pg. 9.

² Congreso de Colombia. Ley general de sostenibilidad. Capítulo 1 [Artículo 1]. 2014. Disponible en <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/22602-11506.pdf>

³ Charles E. Wyman. BIOMASS ETHANOL: Technical Progress, Opportunities, and Commercial Challenges. Annual Review of Energy and the Environment, Volume 24, 1999. Pg. 196.

⁴ Roberto Rinaldi, and Ferdi Schth. 2009. Acid Hydrolysis of Cellulose as the Entry Point into Biorefinery Schemes. 2020, mayo 15, de CHEMSUSCHEM Recuperado de DOI: 10.1002/cssc.200900188

líquido rico en hemicelulosa, el cual se conoce como hidrolizado.⁵ Actualmente este hidrolizado es llevado al tratamiento de aguas residuales, un ejemplo, son las aguas residuales de las cervecerías, que son el resultado de diferentes etapas de producción, que contienen residuos de materias primas como sólidos, azúcares y levaduras, entre otros componentes. El tratamiento de estas aguas provenientes de las cervecerías industriales, se realiza a través de procesos aeróbicos y anaeróbicos. Existen varias opciones de tratamiento aeróbico, una de ellas, es por medio de lodo activado aeróbico, donde la biodigestión es realizada por consorcios microbianos, donde estos microorganismos crecen adheridos a un soporte, sin embargo, hay que tener en cuenta la proliferación, ya que pueden llegar a generar cantidades excesivas de lodo, esto debido a la variabilidad fisicoquímica de las aguas residuales. También cabe comparar la degradación de la materia orgánica en sistemas anaeróbicos, la cual tiene una gran ventaja al evitar la aireación, lo que genera un bajo consumo de energía, pero así mismo, la generación de lodos es lenta, por lo tanto, son procesos lentos y resulta más eficiente utilizar un tratamiento aeróbico.⁶

El hidrolizado, al ser rico en hemicelulosa, se puede aprovechar para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia. Algunos estudios, presentan el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica por hidrólisis térmica y muestran que la composición del hidrolizado presenta altas concentraciones de DQO (80.000-120.000 mg/L)⁷, las cuales tienen una gran desventaja, ya que en los procesos biológicos no se suele trabajar con concentraciones altas, por lo cual se debe realizar una dilución del hidrolizado, lo que lleva a un alto consumo de agua y un alto costo dentro de una biorrefinería.

De acuerdo a lo anterior, uno de los grandes retos, radica en desarrollar una tecnología para lograr aprovechar este hidrolizado, el cual posee concentraciones de DQO altas, de acuerdo a revisiones bibliográficas y a estudios realizados anteriormente (898 ± 55 mg/L), por lo que se han empleado algunas configuraciones como el reactor de lecho estructurado (ASTBR), donde el lecho estructurado es polietileno de baja densidad, el cual permite una alta adhesión de biomasa a la superficie del lecho, llevando a un aumento de la concentración de biomasa en el reactor; y el reactor de diámetro variable o escalonado (REM), el cual se basa en el cambio de diámetro que ocasiona una diferencia de presión del fluido y favorece,

⁵ Fernanda Resende Ribeiro, Fabiana Passos, Leandro Vinícius Alves Gurgel, Bruno Eduardo Lobo Baêta, Sérgio Francisco de Aquino. 2017. Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. 2020, mayo 14, science <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717301870?via%3Dihub>

⁶ Mabel Karina Arantes, Helton José Alves, Rodrigo Sequinel, Edson Antônioda Silva. 2017. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. 2020, mayo 1, de ScienceDirect. Recuperado <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917335516?via%3Dihub>

⁷ Ribeiro, F. R. Produção de biogás a partir de hidrolisados gerados no pré-tratamento por auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar. Maestría en ingeniería ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. 2016.

para que gran parte de la biomasa se retenga en el reactor, indicando que las configuraciones ASTBR y REM ya han sido estudiadas por los autores Fabian Otalora⁸ y Jineth Oviedo⁹, y desarrolladas previamente por la Universidad Antonio Nariño. En este proyecto se plantea una nueva configuración de reactor, denominado biorreactor híbrido, ya que toma el principio del REM, para mantener la biomasa en las cámaras bajas y el principio del ASTBR, para la última cámara del REM, lo que permite retener la biomasa que pasa de las cámaras inferiores. Con esta nueva configuración, se busca retener la mayor cantidad de biomasa en el reactor, en pro de aumentar el tiempo de retención de sólidos (SRT), con el objetivo de tratar una mayor concentración de sustrato y disminuir los requerimientos de agua de dilución del hidrolizado.

⁸ Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 34.

⁹ Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 20.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento hidrodinámico y la operación del biorreactor anaerobio híbrido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la hidrodinámica de un biorreactor híbrido empleando el método de ensayo de trazadores.
- Identificar la influencia del lodo granular y del lecho estructurado en el trazador seleccionado.
- Caracterizar la biomasa dentro del biorreactor anaerobio híbrido, durante la operación.

1. MARCO TEÓRICO

El primer capítulo se enfoca, en los conceptos básicos y necesarios para el entendimiento de este proyecto, dado que son de gran importancia, para la evaluación de la producción de biogás en un biorreactor híbrido por su nueva configuración, lo que logrará aportar una mayor adhesión de biomasa, utilizando el carbón activado en polvo como material adsorbente.

1.1 BIOMASA

La biomasa es el conjunto de materia orgánica que puede ser de origen vegetal, animal o artificial, y se puede transformar en productos líquidos, sólidos y gaseosos. Existen varios tipos de biomasa, la natural, que es la que se produce espontáneamente en ecosistemas naturales sin intervención humana, la biomasa seca proveniente de los subproductos sólidos no utilizados en actividades agrícolas, forestales, industrias madereras y agroalimentarias, la biomasa residual húmeda que procede de vertidos biodegradables, es decir, aguas residuales industriales, urbanas y cualquier desecho o residuo de los seres vivos de manera natural y/o artificial, la biomasa cultivada, la cual se refiere a la biomasa que es cultivada de manera intencional, con el fin de ser transformada y aprovechada con intervención tecnológica por parte del ser humano, y por último los biocarburantes, los cuales se originan del reciclado de aceites.¹⁰

Según Mustafa Balat y Günhan Ayar¹¹, el aprovechamiento de la biomasa a nivel energético, es más económico y más eficiente que otras fuentes de energía, la biomasa tiene un gran potencial de ser aprovechada, ya que es inagotable y amigable con el medio ambiente, puesto que no destruye la capa de ozono. Por otro lado, la biomasa se quema por medio de la combustión directa para producir vapor, la cual hace girar una turbina y posteriormente se acciona un generador, esto con el fin de producir electricidad.

La biomasa es considerada una de las fuentes de energía renovable y sostenible más limpia, el escepticismo en el área de su producción es restringida, lo que hace que los procesos de conversión de tecnología sean impresionantes, el principal beneficio de la aplicación de la biomasa en la industria, es minimizar el efecto de las emisiones de gases de efecto invernadero, a través de la reducción de la producción de los compuestos o elementos venenosos.¹² En la ilustración 1, se puede observar cada uno de los componentes mencionados anteriormente, este conjunto se

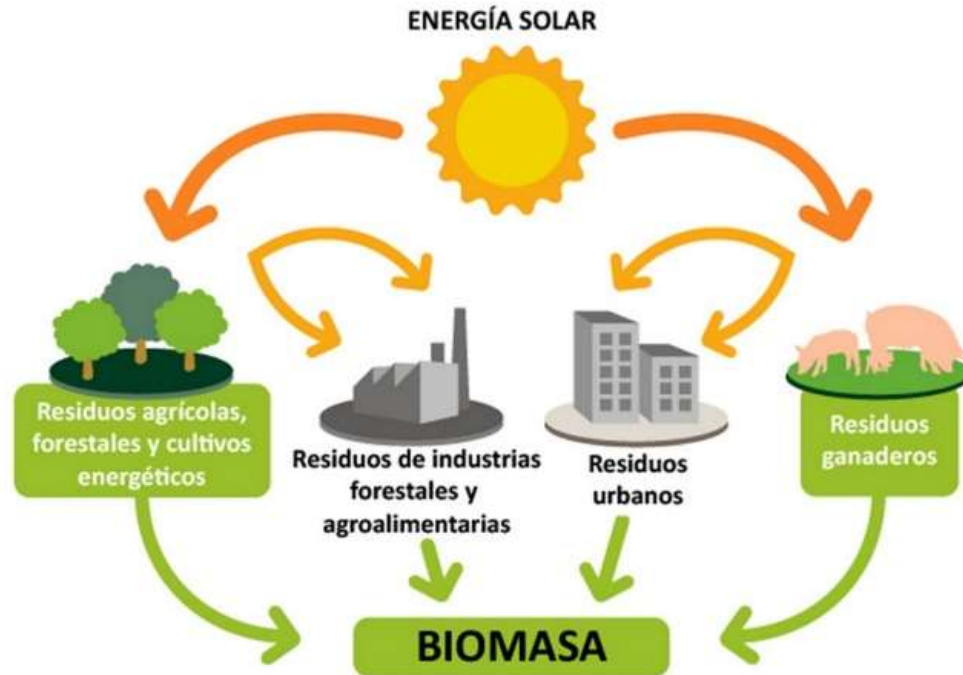
¹⁰ Balat, Mustafa. Ayar Günhan. Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends. 2020 mayo 26, de Taylor and Francis online. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00908310490449045>. Pg. 932.

¹¹ *Ibíd.*, p. 933.

¹² Opia Chukwunonso Anthony. Biomass as a potential source of sustainable fuel, chemical and tribological materials – Overview. 2020, junio 15, de Science Direct Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320326602?via%3Dihub>. 2020

considera un sistema ecológico, el cual no genera muchos gastos, ya que una de las fuentes principales para obtener la biomasa, es la energía solar.

Ilustración 1. Fuentes de obtención de biomasa



Fuente: Eneria energy, 2020.

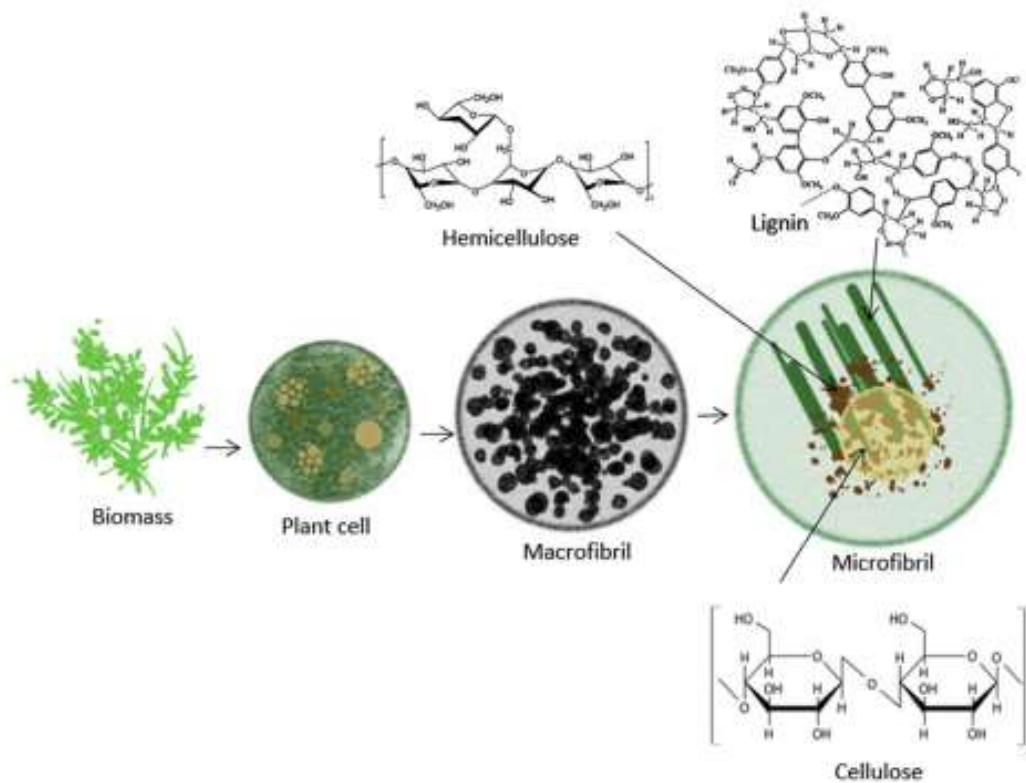
1.2 BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

Se trata del material orgánico más abundante en la tierra, está compuesta por una matriz que contiene esteres extraíbles, proteínas, carbohidratos, celulosa, hemicelulosa, lignina, material mineral, componentes de los carbohidratos, elementos que son fermentables después de la hidrólisis, lo que hace que la biomasa lignocelulósica, sea una de las materias primas más abundantes en la tierra, y que puede ser adecuada para la producción sostenible, tanto de biocombustibles, como de bioenergía como el biogás.¹³ Sin embargo, las características inherentes de la biomasa lignocelulósica, al igual que sus propiedades estructurales y químicas, la hacen resistente a la biodegradación por enzimas y microbios. Es un hetero polímero complejo, el cual proviene de fuentes industriales, agrícolas, forestales y municipales, dentro de las aplicaciones principales, se encuentran la de combustible, alimento animal y construcción, sin embargo, actualmente las aplicaciones de esta, son mayores, sirve como base para

¹³ Yi Zheng, Jia Zhao, Fuqing Xu, Yebo Li. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. 2020, mayo 1, de science direct Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/pii/S036012851400002>.

la obtención de productos químicos, materiales de construcción, pirólisis para obtener combustibles líquidos y gaseosos, fermentación alcohólica, combustión para producir carbón vegetal, producción de biogás, gasificación para obtener dióxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂) y nitrógeno (N). La biomasa lignocelulósica, así como sus materiales, tienen la gran ventaja de ser biodegradables y renovables, por lo que representan una forma sostenible y amigable con el medio ambiente aprovechando la energía solar.¹⁴ En la ilustración 2 se puede observar la estructura de la biomasa lignocelulósica, con sus componentes principales como lo son la lignina, la celulosa y la hemicelulosa.

Ilustración 2. Estructura biomasa lignocelulósica



Fuente: Jędrzejczyk, Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass, 2019.

1.2.1 Materiales lignocelulósicos. Según lo expuesto por el autor Yi Zheng¹⁵, la aplicación de pretratamientos a los materiales lignocelulósicos, permite disociar el complejo formado por la hemicelulosa, celulosa y lignina; de esta manera se puede emplear cada una de las fracciones, como materia prima para la obtención de diversos productos químicos, para mejorar la producción de biogás, a partir de la

¹⁴ *Ibíd.*, p. 3

¹⁵ *Ibíd.*, p. 3

biomasa lignocelulósica, es necesario un proceso de pretratamiento para interrumpir los puentes de carbohidratos-lignina naturalmente fuertes, que perjudican la accesibilidad de las enzimas y los microbios a la celulosa y la hemicelulosa, para lograr la hidrólisis de la biomasa lignocelulósica, es necesario realizar pretratamientos, que pueden tener efecto en uno o más de estos aspectos, y algunos pueden considerarse más favorables que otros. Procedemos a explicar, todos y cada uno de los componentes de la biomasa lignocelulósica y los pretratamientos que pueden ser aplicados a la misma.

1.2.1.1 Pretratamiento mecánico. Se basa en realizar el corte de la biomasa lignocelulósica en pedazos pequeños, esta reducción de tamaño se hace con el fin de aumentar la superficie disponible y reducir el grado de polimerización.¹⁶

1.2.1.2 Pretratamiento térmico. La biomasa lignocelulósica se debe calentar, así la temperatura aumenta por encima de 150-180 °C, primero la hemicelulosa y después la lignina comenzaran a solubilizarse. Durante los procesos térmicos, una parte de la hemicelulosa se hidroliza y forma ácidos, estos siguen catalizando la hidrólisis de la hemicelulosa.¹⁷

1.2.1.3 Pretratamiento con vapor de agua. La biomasa se debe poner en un recipiente grande, a altas temperaturas hasta 240°C y presión, durante unos minutos, después de este tiempo, el vapor se libera y la biomasa se enfría rápidamente, para así poder solubilizar la hemicelulosa y de esta forma, tener mejor acceso a la hidrólisis enzimática de la celulosa, evitando la formación de los inhibidores.¹⁸

1.2.1.4 Pretratamiento con agua caliente. En este caso el agua está líquida, el fin de este pretratamiento, es solubilizar principalmente la hemicelulosa para tener mejor acceso a la celulosa y evitar la formación de inhibidores.¹⁹

1.2.1.5 Pretratamiento ácido. Es una tecnología común para el proceso de producción de bioetanol, se han realizado pocos estudios sobre el impacto del pretratamiento con ácido, en la producción de biogás para la obtención anaeróbica en la digestión de la biomasa lignocelulósica. El objetivo es solubilizar la hemicelulosa, y lograr con esto, mejor acceso a la celulosa, este se puede hacer con ácidos diluidos o con ácidos fuertes. Sin embargo, los pretratamientos con ácidos diluidos, no son tan efectivos, ya que no se ve un cambio significativo en la mejora del rendimiento del biogás proveniente de la biomasa lignocelulósica.²⁰

¹⁶ Hendriks. G, Zeeman. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. 2020, mayo 26, de ScienceDirect Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>. 2008. Pg.11.

¹⁷ *Ibíd.*, p.12.

¹⁸ *Ibíd.*, p.12.

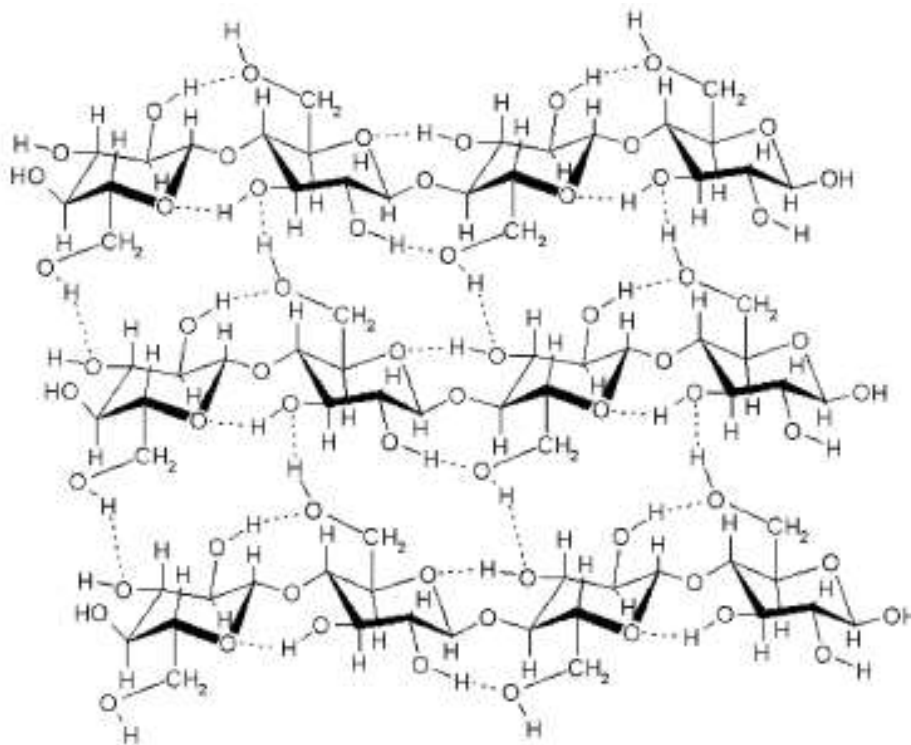
¹⁹ *Ibíd.*, p.12.

²⁰ *Ibíd.*, p.13.

1.2.1.6 Pretratamiento alcalino. Es un proceso en el cual se utilizan bases como NaOH, KOH y Ca (OH)₂, con el fin de eliminar, ya sea la lignina, la celulosa o la hemicelulosa, logrando que esta sea más accesible a los microbios y las enzimas puedan degradar la biomasa lignocelulosa, las primeras reacciones son la solvatación y saponificación, con el fin de que la biomasa se expanda, en altas concentraciones alcalinas, ocurre una hidrólisis alcalina, lo cual conlleva a la degradación y descomposición de polisacáridos.²¹

1.2.2 Celulosa. La celulosa es el principal componente de las paredes celulares de la lignocelulosa, las moléculas de celulosa tienen diferentes orientaciones a lo largo de la estructura, lo que lleva a diferentes niveles de cristalinidad. Así, la celulosa consta de dos regiones: amorfa (baja cristalinidad) y regiones cristalinas (de alta cristalinidad), también es considerada como un compuesto orgánico o biopolímero que forma estructuras biológicas vegetales, posee estructura cristalina, debido a la presencia de puentes de hidrógeno, los cuales se pueden observar en la ilustración 3, estos puentes influyen en su morfología, resistencia y rigidez.²²

Ilustración 3. Estructura de la celulosa



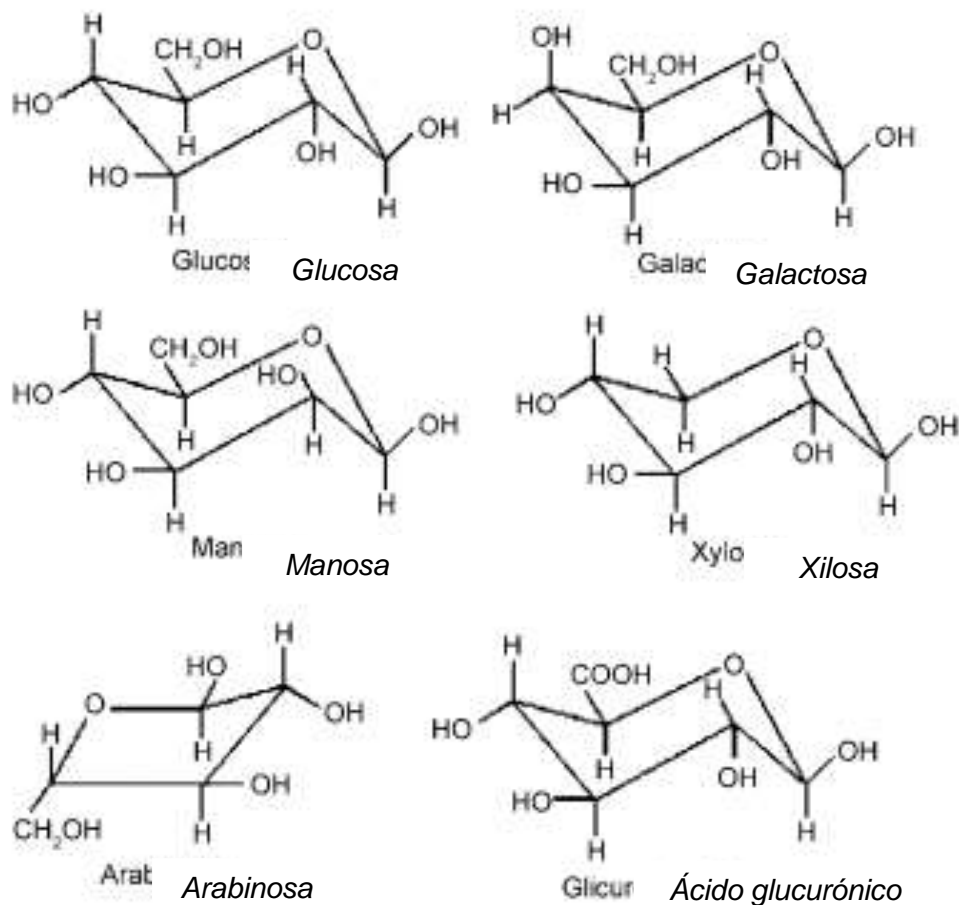
Fuente: Stöcker, Biofuels and Biomass-To-Liquid Fuels in the Biorefinery: Catalytic Conversion of Lignocellulosic Biomass using Porous Materials, 2018.

²¹ *Ibíd.*, p.14.

²² Fengel, Dientrich. Wegener, Gerd. WOOD Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin-New York: DE GRUYTER. 1989. Pg. 66.

1.2.3 Hemicelulosa. Es una estructura no cristalina compleja de carbohidratos, que se constituye principalmente de polímeros como: pentosas, hexosas y ácidos urónicos como se muestra en la ilustración 4. Es fácil de hidrolizar, debido a que las cadenas con las que se compone, no son lineales y tiene ramificaciones laterales, contiene un peso molecular más bajo que la celulosa, y sirve como una conexión entre la lignina y la celulosa.²³

Ilustración 4. Estructura de la hemicelulosa



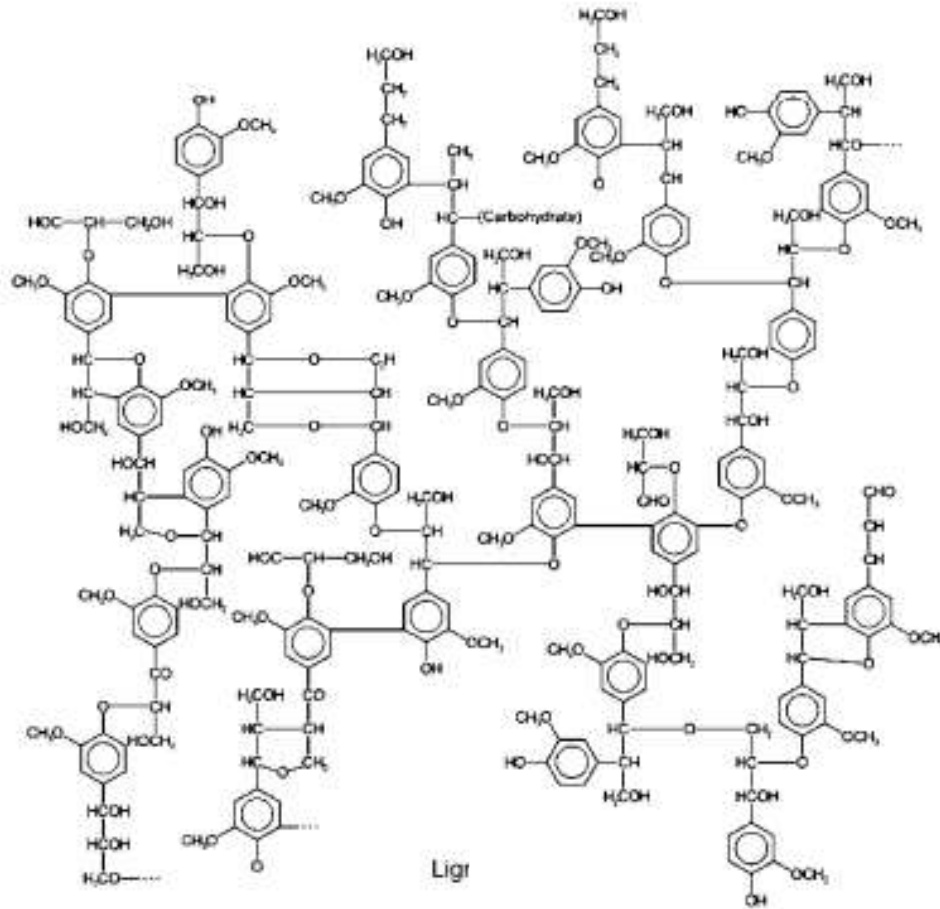
Fuente: Stöcker, *Biofuels and Biomass-To-Liquid Fuels in the Biorefinery: Catalytic Conversion of Lignocellulosic Biomass using Porous Materials*, 2008.

1.2.4 Lignina. La lignina es la materia orgánica más abundante en la naturaleza, después de la celulosa y de la hemicelulosa, es un heteropolímero amorfo aromático e hidrófobo, grande y complejo, el cual está construido de unidades de fenilpropano como el alcohol coniferílico y el alcohol sinápico, con grupos funcionales de hidroxilo, metoxilo y carbonilo. La ilustración 5 presenta la estructura general de la

²³ Seishu Tojo, Tadashi Hirasawa. *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Tokio, Japón: Academic Press. Capítulo 7. 2014. Pg. 186.

lignina, esta constituye aproximadamente el 15-25% de la biomasa lignocelulósica, su característica principal, es dar a la planta el soporte estructural, impermeabilidad, y la resistencia, contra un ataque microbiano y el estrés oxidativo, es insoluble en agua, es un hetero polímero amorfo tridimensional, formado por alcoholes que le dan protección a los polisacáridos estructurales que lo conforman, es resistente a la degradación química y biológica.²⁴

Ilustración 5. Estructura de la lignina



Fuente: Stöcker, Biofuels and Biomass-To-Liquid Fuels in the Biorefinery: Catalytic Conversion of Lignocellulosic Biomass using Porous Materials, 2008.

1.3 DIGESTIÓN ANAEROBIA

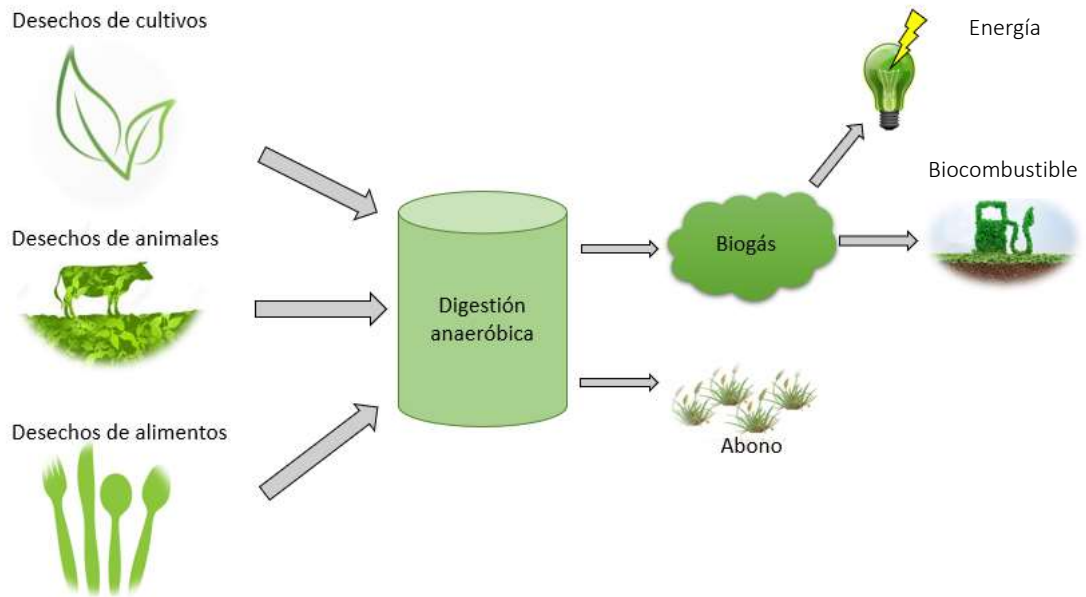
Teniendo en cuenta lo expuesto por Kiang - Yen-Hsiung²⁵, la digestión anaerobia, es considerada un proceso biológico degradativo y químico, que se da en ausencia

²⁴ Fengel. Wegener. Op. Cit., p. 132.

²⁵ Kiang, Yen-Hsiung. Fuel property estimation and combustion process characterization. Chapter 10. Pg. 366.

de oxígeno por un grupo de bacterias, las cuales se encargan de hacer la degradación de la materia orgánica, generando productos como el biogás, el cual está compuesto por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂)”. En la ilustración 6 se puede observar el proceso que se lleva a cabo en la DA, al alimentar desechos orgánicos y de residuos animales en el reactor anaerobio, se puede obtener el biogás, y del gas, salen dos fuentes como lo son la energía y el biometano para combustibles y generación de calor, permitiendo que los residuos de esta DA puedan ser usados como biofertilizante. De acuerdo con el autor mencionado anteriormente, este proceso tiene ventajas técnico-económicas, sin dejar a un lado los factores que deben ser monitoreados durante el proceso, ya que influyen y son importantes en el buen funcionamiento de este, algunos de los parámetros son pH que debe estar en valor entre (6,6 y 7,6), temperatura (35°C), composición residual, nutrientes (N, C, P, S y sales minerales), entre otros.

Ilustración 6. Procesos de digestión anaerobia.



Fuente: Elaboración propia con base en SpensaGroup

Según lo expuesto por los autores Kumar y Samadder²⁶, todos los procesos biológicos de digestión anaerobia son satisfactorios, dependiendo de las condiciones de operación, las cuales son de gran importancia para el crecimiento de los microorganismos que van a realizar la degradación, de manera que los

²⁶Atul, Kumar, S. R., Samadder. (2020). Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. 2020, mayo 15, de ScienceDirect Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>

parámetros tanto químicos como físicos, son relevantes en este proceso biológico, por lo que se enlistan a continuación:

- **Temperatura:** Influye de manera importante, tanto en el crecimiento, como en la sobrevivencia de los microorganismos, lo cuales pueden ser psicrófilos, mesófilos y termófilos. El proceso de DA es capaz de darse en diferentes rangos de temperatura, correspondientes a los microorganismos mencionados anteriormente, sin embargo, de acuerdo a experimentos y estudios, se tiene que la actividad metanogénica es baja a temperaturas bajas (0-20°C), a diferencia de las temperaturas mesofílicas y termofílicas que se ubican en un rango de (15-45°C) y (45-80°C) respectivamente, donde se tiene una velocidad y productividad mayor, por ende, son las condiciones óptimas para la producción de biogás.
- **TRH:** El tiempo de retención hidráulica, es uno de los parámetros más importantes para la producción de biogás, ya que afecta de manera considerable la ecología microbiana en reactores, cuando los TRH son demasiado largos, la producción de metano disminuye, por lo que es aconsejable utilizar TRH cortos en los cuales esta producción y el porcentaje de metano aumentaran.
- **pH:** El pH del reactor es importante para la eficiencia del proceso de digestión, y puede variar debido a algunos factores, por ejemplo, la concentración como bicarbonato, AGV, CO₂, producido y la alcalinidad, teniendo en cuenta lo anterior se ha demostrado con estudios, que el pH óptimo para el proceso de DA esta entre un rango de 6,7 y 7,5 ya que las bacterias metanogénicas trabajan de manera efectiva en este rango.
- **Nutrientes:** En el proceso de DA se necesitan micronutrientes y elementos traza, como nitrógeno, cobalto, hierro, níquel, zinc, fósforo, sulfuros, potasio, calcio, magnesio, manganeso y cobre, para así brindar un crecimiento óptimo de estas bacterias. Las bacterias formadoras de metano, poseen concentraciones altas de níquel, cobalto y hierro, por lo cual se podría decir que los elementos mencionados anteriormente no son necesarios, sin embargo, la ausencia de estos, puede tener efectos negativos en el crecimiento y rendimiento microbiano. Por otra parte, para hacer una selección correcta de los parámetros de operación para la digestión anaerobia, se tuvo en cuenta lo expuesto por el autor Fabián Camilo Otálora²⁷, quien realizó su proyecto con un reactor de 2,3 L, tiempo de retención hidráulico 8 h, la temperatura fue de 35 °C, el tipo de sustrato usado fue licor de pentosas después de primera etapa de biometanización (DQO: 434,57 - 775,13 mg/L), el flujo de operación 1,6 mL/min, la carga orgánica de 1,01 - 2,32 Kg/m³.d, un pH de 6,86 - 7,83, en donde se evidencia que se emplearon dos tipos de reactores, ASTBR y RME para realizar las dos etapas del proceso de biometanización de forma separada, esto con el fin de comparar

²⁷ Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg.34.

y monitorear sus resultados, durante un periodo de tiempo de 42 días. Adicionalmente se utilizó ceniza de bagazo de caña como material adsorbente, y así lograr adsorber los inhibidores presentes en el licor de pentosas. Respecto a la producción de biogás, se alcanzaron valores 0,626 NLd-1 con un 42,5 % como CH₄, y en el trabajo de grado realizado por Jineth Andrea Arango Oviedo²⁸, se tuvieron en cuenta las condiciones de operación del reactor, las cuales se mantuvieron a una temperatura de 35°C, y se operó en dos etapas, la primera etapa considerada como la etapa de adaptación, el reactor tuvo un tiempo de retención hidráulico de 8 horas, y fue alimentado con hidrolizado hemicelulósico del BC, con una DQO de 898 ± 55 mg/L y operó a una carga orgánica (OLR) de 2,45 ± 0,27 g DQO/Ld, en la segunda etapa donde se realizó un cambio OLR a aproximadamente 2,25 DQO/Ld, aumentando el TRH a 24 horas y la DQO del sustrato a 3000 mg.L-1. El pH del sustrato fue ajustado a 7± 0,2 con bicarbonato de sodio, se adicionó una solución nutriente cada vez que se alimentaba el reactor, también se trabajó con un sistema sifón en el efluente del reactor, con el fin de tener menos pérdidas de biogás. De acuerdo a lo expuesto por los autores²⁹, la digestión anaerobia es uno de los procesos anaerobios más antiguos, y fue usado por primera vez, hace más de un siglo y consta principalmente de 4 etapas, las cuales se detallan así:

1.3.1 Hidrólisis. En esta primera etapa, se puede obtener la generación de biogás donde las proteínas, lípidos y polisacáridos, son hidrolizados en moléculas más pequeñas por medio de enzimas, para convertirlos en compuestos más sencillos, como lo son los ácidos grasos, azúcares y aminoácidos, ya que estos tienen un peso molecular más bajo.³⁰

1.3.2 Acidogénesis. En esta etapa, se da la fermentación y oxidación de los productos de la hidrólisis y son adsorbidos por bacterias facultativas, que son las que degradan los ácidos. Los ácidos grasos, aminoácidos y azúcares, son transformados en alcoholes y ácidos orgánicos de cadena corta, esta etapa es realizada por las bacterias fermentativas y es una de las etapas más fuertes e importantes, de la cual depende todo el proceso de digestión anaerobia.³¹

1.3.3 Acetogénesis. Los ácidos grasos volátiles y alcoholes que se obtienen en la acidogénesis se convierten en acetato, H₂, CO₂ a través de bacterias acetogénicas que son las encargadas de evitar la disminución del pH conservando la presión parcial del sistema baja.³²

²⁸ Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 32.

²⁹ E. Uçkun Kiran, K. Stamatelatou, G. Antonopoulou, G. Lyberatos. Handbook of Biofuels Production (Second Edition), chapter 10 Production of biogas via anaerobic digestion. National Technical University of Athens, Athens, Greece: Elsevier. 2016

³⁰ *Ibíd.*, p.260.

³¹ *Ibíd.*, p.260.

³² *Ibíd.*, p.260.

1.3.4 Metanogénesis. Consiste en la transformación de los productos, de la etapa anterior para producir metano, esto se hace por medio de las bacterias metanogénicas que actúan acorde al tipo de sustrato disponible, existen dos grandes grupos de bacterias, las metanogénicas hidrogenófilas que son las que reducen el hidrógeno gaseoso producido en la acetogénesis, y mediante rutas metabólicas producen el metano, y las metanogénicas acetoclásticas que son las que degradan los ácidos orgánicos para obtener metano y dióxido de carbono.³³

1.4 BIOGÁS

Es una mezcla de gas compuesto principalmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y trazas de diversos gases, como nitrógeno (N), hidrógeno (H₂) y ácido sulfhídrico (H₂S), este se forma cuando la materia orgánica, es degradada por medio de un proceso en ausencia de oxígeno, como lo es la digestión anaerobia, este biocombustible tiene un valor energético elevado, por lo que puede ser transformado en energía para hornos, estufas, calderas, entre otros.³⁴ En la tabla 1 se pueden observar los componentes principales y características generales del biogás.

Tabla 1. Generalidades del Biogás

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente combustible	de 0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura ignición	de 650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhauser, 2008.

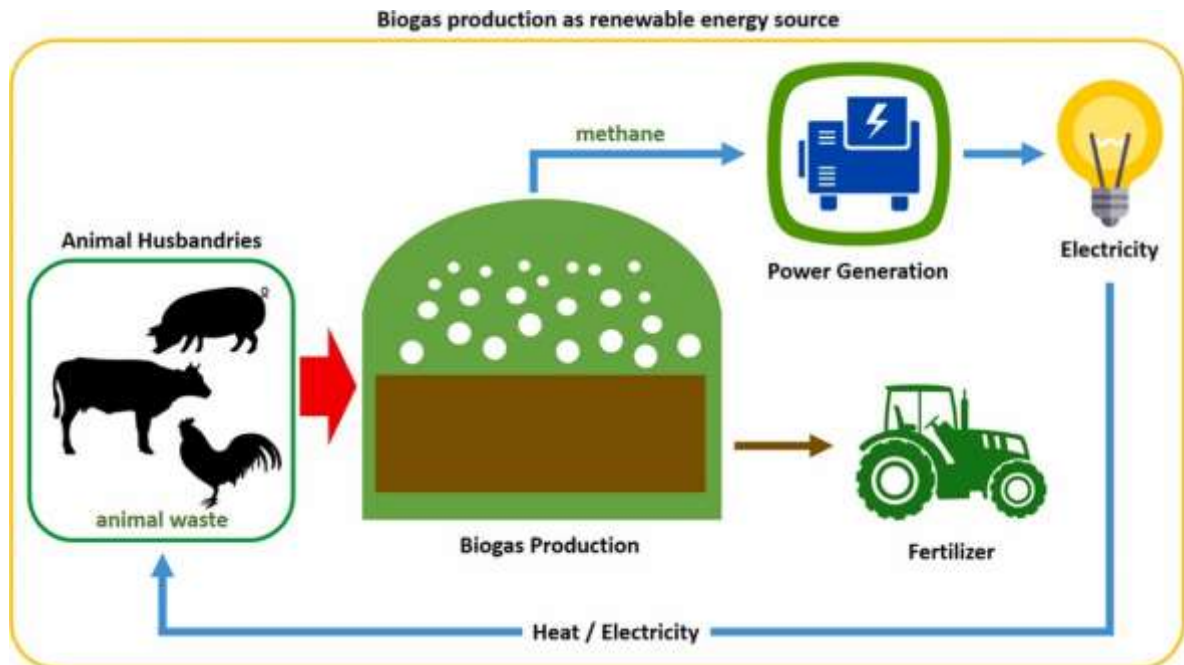
Conforme a lo que antecede, se puede llegar a concluir, que la producción de biogás es importante para generar energía calórica, y así mismo, para disminuir y evitar la

³³ *Ibíd.*, p.260.

³⁴ Weiland, P. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* **85**, 849–860. 2010. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

dependencia del uso de combustibles fósiles³⁵, la ilustración 7 nos permite observar, cómo se puede obtener este biocombustible a partir de biomasa residual, producida, entre otras por (residuos urbanos, agrícolas y efluentes de tratamientos de aguas), por lo mencionado anteriormente, se puede determinar que las características del biogás, son menos contaminantes a la atmosfera, a comparación de los combustibles generados por el petróleo o por el carbón, ya que la emisión de dióxido de carbono es más baja.³⁶

Ilustración 7. Obtención de biogás



Fuente: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.

1.4 TIPO DE REACTORES

Para el desarrollo de este proyecto, resulta necesario hablar de los reactores de alta tasa, puesto que estos, están diseñados para soportar altas cargas orgánicas, presentando resultados favorables para la producción de biogás. Teniendo en cuenta estudios que se han realizado anteriormente, se puede hablar de los reactores UASB y EGSB, que corresponden al reactor de lecho fijo con flujo ascendente, y al reactor de lecho expandido respectivamente, estudiados por parte

³⁵ *Ibíd.*, p.260.

³⁶ Fuess Tadeu, Lucas. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinase. 2016. Disponible en: www.elsevier.com/locate/apenergy

de Mario Kato ³⁷, quien determinó el efecto del oxígeno disuelto en los lodos granulares, enfocándose en la actividad metanogénica y en el tratamiento de aguas residuales de baja resistencia. El UASB se dejó operar durante un TRH de 2,6 horas, y se verificó que este no tenía dificultad en la retención de lodos, sin embargo al no tener la intensidad de mezcla completa necesaria, se tuvo un contacto bajo entre la biomasa y las aguas residuales, por ende, la producción de biogás es muy baja; por otro lado, el reactor EGSB tuvo un alto rendimiento en el porcentaje de remoción de DQO, arrojando un rango entre (80% a 97%) y presentando una eficiencia en la producción de biogás, el MBR, que es el biorreactor de membrana, en el estudio realizado por J. Dosta, J.M. Nieto, J. Vila, M. Grifoll, J. Mata-Álvarez ³⁸, demuestra que el biorreactor de membrana funciona de manera eficiente, el EGSB que es el reactor de lecho expandido, presenta un comportamiento óptimo para el tratamiento de aguas residuales, demostrando alta eficiencia en porcentajes de remoción de fenoles y con tiempos de retención bajos.

Las configuraciones ASTBR y REM de las cuales se habla a continuación, también son consideradas reactores de alta tasa, consideradas de gran importancia, por lo que en adelante se proporcionará una explicación de fondo de cada una de ellas, aunado a que finalmente estas son las que componen el biorreactor híbrido, que se desarrolla a lo largo de este proyecto.

1.4.1 Reactor escalonando metanogénico (REM). Esta configuración se basa en un recipiente biorreactor de diámetro variable, configurado para la producción de material biológico que conlleva dos secciones, en la primera el diámetro configurado para contener un medio líquido y material biológico, y en la segunda sección de recipiente, con diámetro mayor que el primer diámetro, de manera que el medio líquido se aumente de un primer volumen, a un segundo volumen dentro del recipiente.³⁹ Los biorreactores de diámetro variables, se pueden construir de cualquier material y pueden ser configurados para uso de sistemas desechables, los cuales pueden adaptarse a métodos de un solo uso o en suites multiproducto, y tener cualquier volumen total deseado. De acuerdo con esto, se puede decir que el reactor metanogénico escalonado es un biorreactor anaerobio de flujo ascendente el cual posee 2 o más variaciones en su diámetro, estas variaciones de diámetro dentro del reactor proporcionan un comportamiento de mezcla completa, a través de remolinos, el primer compartimento que corresponde al menor diámetro, se enfoca en almacenar el material biológico, es decir el inóculo, y el segundo compartimento de diámetro mayor al primero y el tercer compartimento de diámetro mayor al segundo, como se observa en la ilustración 8, permiten que el fluido pueda

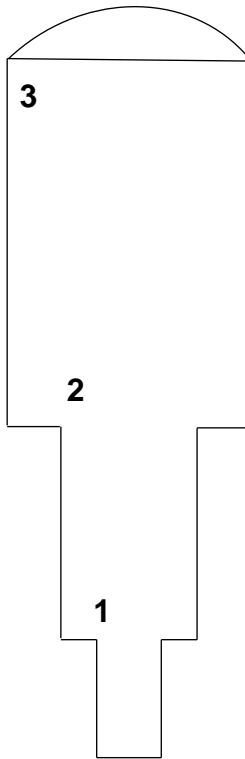
³⁷ Mario T. Kato, Jim A. Field, Gatzke Lettinga, The anaerobic treatment of low strength wastewaters in UASB and EGSB reactors, *Water Science and Technology*, Volume 36, Issues 6–7, Pg 375-382, ISSN 0273-1223. 1997. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00545-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00545-3).

³⁸ J. Dosta, J.M. Nieto, J. Vila, M. Grifoll, J. Mata-Álvarez, Phenol removal from hypersaline wastewaters in a Membrane Biological Reactor (MBR): Operation and microbiological characterisation, *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 5, Pg 4013-4020, ISSN 0960-8524. 2011. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.123>.

³⁹ MIETZNER, et Al., Patente No. US2017/0369828 A1, 2017. Pg. 4

expandirse, reduciendo la velocidad del flujo y por consiguiente evitando la pérdida de biomasa en la parte superior del reactor.⁴⁰

Ilustración 8. Reactor metanogénico escalonado (1 diámetro menor, 2 diámetro medio y 3 diámetro mayor)



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la ilustración anterior, se tienen tres diferentes diámetros, el diámetro menor es de $1\frac{1}{2}$ " que corresponde a la sección 1, el diámetro medio es de 2" que corresponde a la sección 2 y por último se tiene el diámetro mayor que es de 4" correspondiente a la sección 3. Este reactor tiene, tanto ventajas, como desventajas, las cuales se reflejan en la tabla 2 teniendo en cuenta

⁴⁰ Pérez Peña, Sergio Alejandro. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR), Tesis de pregrado. Universidad de América. 2020. Pg. 28

los resultados obtenidos por los estudios realizado anteriormente por algunos autores como Fabian Otalora⁴¹ y Sergio Pérez⁴².

Tabla 2. Ventajas y desventajas del RME

Ventajas	Desventajas
Costos de operación bajos	La estabilización del reactor llega a tomar hasta 12 horas
Porcentaje alto de remoción de materia orgánica	Generación de malos olores
Se pueden manejar altas concentraciones de DQO	Debe ser monitoreado y controlado todo el proceso dentro del mismo

Fuente: Elaboración propia con base en la Tesis Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR)

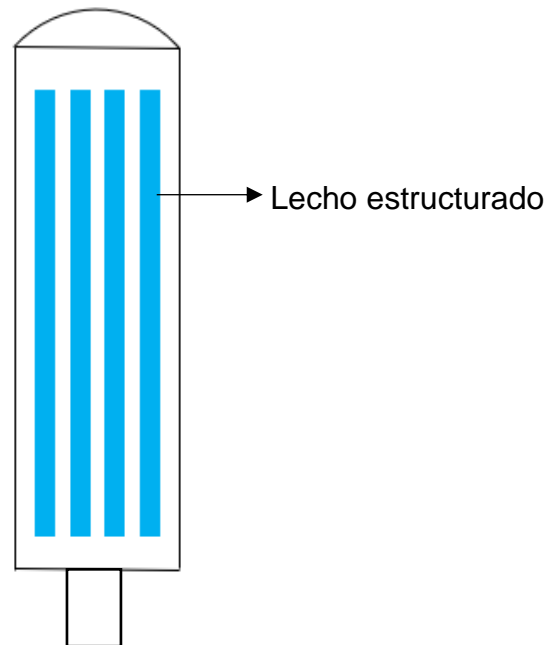
1.4.2 Reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR). Este reactor cuenta con un lecho estructurado y es de flujo ascendente, el lecho estructurado se compone de un soporte con espumas de polietileno de baja densidad, la cual tiene como objetivo la adhesión y/o fijación de la biomasa, de acuerdo a lo expuesto por la autora Jineth Arango⁴³, generando así, que la biomasa se adhiera a la superficie del lecho estructurado, con el fin de obtener una mayor concentración de biomasa dentro del biorreactor, en la ilustración 9 se puede observar un diagrama del reactor ASTBR.

⁴¹Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 39.

⁴² Pérez Peña, Sergio Alejandro. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR), Tesis de pregrado. Universidad de América. 2020.

⁴³ Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018.

Ilustración 9. Reactor ASTBR



Fuente: Elaboración propia

1.5 LODO GRANULAR

Los gránulos y el lodo granulado, presentan una gran capacidad para tratar las aguas residuales, debido a que tienen dos ventajas principales sobre el lodo floculante: en primer lugar, el lodo granulado tiene una mayor velocidad de sedimentación, se caracteriza por tener alta retención de biomasa y capacidad para soportar altas cargas a diferencia del lodo floculante, por lo que podemos decir que los gránulos se retienen mejor en los digestores anaeróbicos, en segundo lugar el lodo granular tiene una mayor actividad metanogénica específica que el lodo floculante, lo que da lugar a una mayor conversión de los desechos en metano, en la búsqueda de la aclaración del mecanismo de granulación según Zhou⁴⁴, demostraron que el sustrato producía más electrolitos en el reactor, lo que mejoraba la granulación y, por lo tanto, la eficiencia del tratamiento, además de reducir el tiempo de arranque, también se han desarrollado a lo largo de los años varias teorías y modelos de granulación anaeróbica de lodos, sin embargo según Schmidt y Ahring⁴⁵, los gránulos anaeróbicos se han descrito como biopelículas esféricas y según el examen, existen similitudes entre la formación de biopelículas y el proceso de granulación, también es importante tener presente, que el proceso de granulación anaeróbica es demasiado complejo ya que se ve afectado por

⁴⁴ Bhatti, Zhou. UASB reactor startup for the treatment of municipal wastewater followed by advanced oxidation process. 2014. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/bjce/v31n3/14.pdf>

⁴⁵ Schmidt, J.E., Ahring, B.K. Granulation in thermophilic upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors. *Antonie van Leeuwenhoek* **68**, 339–344 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF00874144>

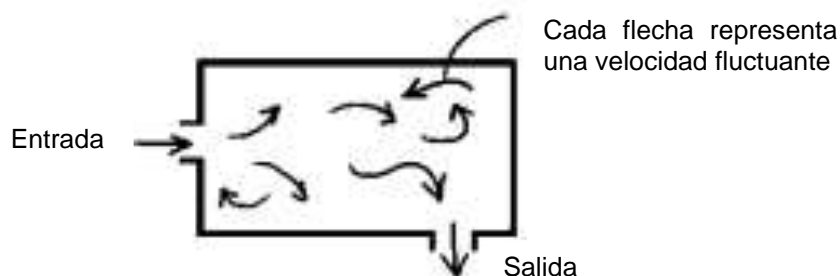
diferentes parámetros fisicoquímicos y depende en gran medida del crecimiento bacteriano, en atención a que los compuestos orgánicos e inorgánicos que se generan durante el metabolismo bacteriano, pueden promover la formación de núcleos.

La tecnología de lodo granular aeróbico (LGA) para el tratamiento de aguas residuales, ha sido materia de investigación en países desarrollados, debido a sus amplias ventajas con respecto a los métodos convencionales de tratamiento biológico (digestión anaerobia) en cuanto a la reducción de espacios, eficiencia en remoción de materia orgánica, nutrientes, simplicidad de operación y mantenimiento, siendo una alternativa adecuada para la solución de la problemática actual, descrita para el sector industrial y sus residuos líquidos, los lodos residuales digeridos anaeróbicamente, se utilizan para alimentar reactores industriales de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB).⁴⁶ Uno de los principales problemas asociados con esta configuración de reactores, es el tiempo que se requiere para iniciar su operación, ya que la inoculación se realiza con los lodos floculantes, por lo que es necesario iniciar con la granulación mejorada, ya que se requiere reducir el tiempo y mejorar la eficiencia de este tratamiento para así reducir costos, la temperatura óptima para esta granulación, oscila entre el rango de 35 a 55°C, un pH entre 6.7 y 7.4, y por último una OLR relativamente alta, para que así mismo, el crecimiento de biomasa sea mayor y por ende la producción de biogás.

1.6 ENSAYO DE TRAZADORES

Según Levenspiel⁴⁷, *“Para decir cómo se comportará un recipiente como intercambiador de calor, absorbedor, reactor u otra unidad de proceso, necesitamos saber cómo fluyen los materiales a través del recipiente, lo que se debe hacer exactamente es medir la velocidad fluctuante del material que fluye en diferentes puntos del recipiente y luego analizar los resultados”* a continuación se presenta la ilustración 10 donde se puede observar lo mencionado anteriormente.

Ilustración 10. Flujo en un recipiente



Fuente: Levenspiel, 1998.

⁴⁶Lamprecht, Corné UASB granulation enhancement by microbial inoculum selection and process induction. 2009. Pg. 127

⁴⁷ Levenspiel, Octave. Tracer technology, fluid mechanics and its applications. 1998. Pg.1.

Existen dos tipos de ensayo de trazadores, el cualitativo que es el que demuestra la conexión hidráulica entre dos o más puntos, se vierte una sustancia en el inicio y se observa en el final si esta pasó o no, y el ensayo cuantitativo que es el que se va a trabajar, este cumple la misma función del cualitativo, pero además permite determinar el tiempo y la concentración con la que pasó la sustancia. Este ensayo aplica en un reactor, para luego hacer un análisis detallado de la muestra a la salida del reactor en determinado tiempo, y con esto poder obtener una gráfica de concentración vs tiempo. En dicha curva se puede observar como la concentración del trazador, aumenta a medida que pasa el tiempo hasta alcanzar un valor máximo y luego empieza a decrecer, según Levenspiel⁴⁸, estos métodos son conocidos como método de estímulo-respuesta y se puede utilizar cualquier tipo de señal, en la entrada como señales al azar, señal periódica y señal escalón. De manera que la distribución de las concentraciones en el tiempo, se puede hacer una aproximación visual acerca del reactor en estudio, como un reactor flujo pistón o como un reactor con mezcla completa. La distribución tiende a parecerse a una campana de Gauss, se puede decir que hay una combinación de efectos, aunque por simetría de dicha campana, cuanto más pequeña es la desviación estándar de dichas mediciones, más angosta será la campana, lo cual indica que hay predominio en flujo pistón, y si la desviación crece y la campana se hace más plana entonces, hay una combinación de efectos en flujo pistón y del flujo en mezcla completa. Cuando las distribuciones en el tiempo son asimétricas el comportamiento de los reactores tiende a parecerse a uno de flujo completamente mezclado, así cuanto más asimétrica sea la distribución, menos similar será un reactor de flujo pistón.

⁴⁸ Ibíd., p.7.

2. OE 1 DETERMINAR LA HIDRODINÁMICA DE UN BIORREACTOR HÍBRIDO EMPLEANDO EL MÉTODO DE ENSAYO DE TRAZADORES.

2.1 METODOLOGÍA OE 1

2.1.1 Selección de condiciones de operación.

Teniendo en cuenta lo expuesto por Fabián Otálora⁴⁹, se desarrolló el reactor metanogénico escalonado y el reactor de lecho estructurado respectivamente, estas configuraciones mencionadas anteriormente, son las que se combinan para desarrollar el biorreactor híbrido que se trabajó en este proyecto, las condiciones que se seleccionaron para la operación del biorreactor fueron las siguientes:

- La temperatura de funcionamiento de la fermentación para producir biocombustible depende del tipo de inóculo, que puede adaptarse a condiciones que son mesofílicas, termófilas, o hipertermófila; la producción de H₂ está asociada a la formación de ácidos orgánicos, el uso de un reactor acidógeno, puede proporcionar condiciones positivas para la producción de este gas.⁵⁰ Diversidad de autores han coincidido en afirmar, que la temperatura óptima escogida fue de 35 °C, por lo que fue necesario mantenerla controlada lo cual se explica a fondo en el **anexo B**, esto se llevó a cabo tomando como referencia los microorganismos que crecieron durante el proceso, en este caso, los microorganismos mesófilos que tienen un rango de temperatura óptima para el crecimiento y operación entre los 20 y los 45 °C, se proporcionó a través de un cable de calentamiento instalado en el exterior del biorreactor y alrededor de este, operación monitoreada y controlada con una termocupla y un circuito.
- pH 7, es considerada una actividad enzimática por parte de los microorganismos, la cual permite el cambio de los grupos hidrolizables a enzimas como carboxilos y aminas. Los microorganismos metalogénicos, son susceptibles a las variaciones de pH, por lo que es necesario tener un pH óptimo, en un rango de 6,5 y 7,5 durante la operación. Existen estudios donde se verifica que la producción de biogás, es mayor cuando el pH está entre el rango mencionado anteriormente. Es necesario garantizar alcalinidad en el sistema, de lo contrario, pueden existir factores inhibidores de procesos metabólicos, los cuales pueden afectar y disminuir la producción de biogás.⁵¹

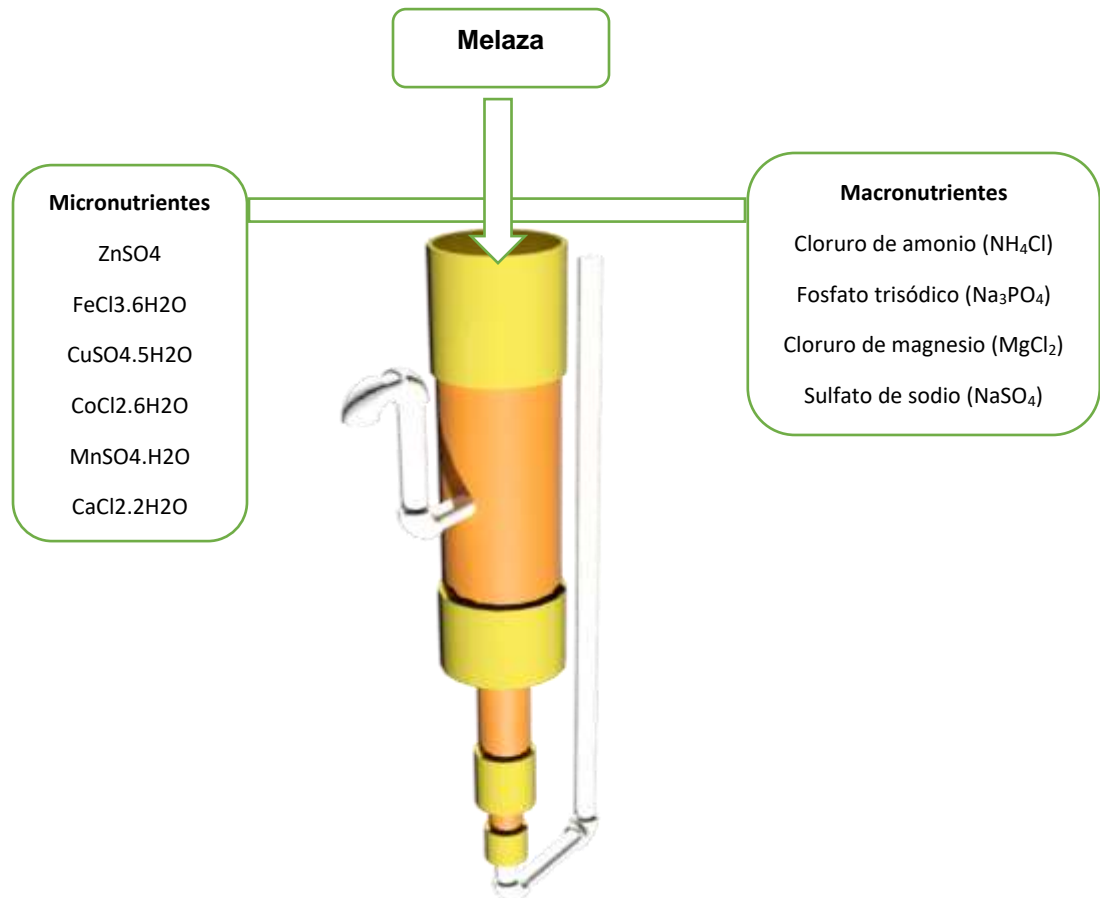
⁴⁹Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 39.

⁵⁰Arantes, Mabel Karina. Alves, Helton José. Sequinel, Rodrigo. Silva, Edson Antônio da. 2017. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. 2020, mayo 1, de science direct Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917335516?via%3Dihub>

⁵¹ Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 44.

- Tipo de sustrato, el agua residual sintética la cuál simula el hidrolizado rico en hemicelulosa, proveniente de la biomasa lignocelulósica, cabe resaltar que esta agua residual sintética, solo va a simular la concentración de DQO, mas no la complejidad del sustrato. Esta agua residual sintética se le conoce también como alimento, y se compone a partir de micronutrientes y macronutrientes, los cuales son necesarios como fuente de energía y para la producción, por último, la melaza como fuente principal de carbono, también se encarga de aportar algunas bacterias necesarias al sistema, el valor de DQO del agua residual sintética, que fue elaborada en el laboratorio, tuvo un valor inicial de 4000 mg/, lo que indica que se trabajó con una DQO relativamente alta, con el fin de determinar la concentración que puede ser degradada por el proceso de digestión anaerobia en el reactor híbrido. A continuación, en la ilustración 11, se mencionan cada uno de los micronutrientes y macronutrientes, necesarios para poder hacer el agua residual sintética y a grandes rasgos, la función de los componentes que se adicionarán para el alimento del biorreactor.

Ilustración 11. Alimentación del biorreactor



Fuente: Elaboración propia

- Caudal de operación experimental y teórico 6,0 y 6,171 mL/min respectivamente, este flujo se calculó con el volumen total del biorreactor (4443mL) y el tiempo de retención hidráulico mínimo correspondiente a 12 horas, es decir 720 minutos
- TRH 12 horas, se puede escoger este tiempo debido a la información de las fuentes bibliográficas donde se puede concluir que al tener un volumen (alto) no es necesario tener un TRH alto para obtener mayor producción de biogás.⁵²

2.1.2 Construcción del biorreactor

- Tubería PVC de color naranja de 1 $\frac{1}{2}$ ", 2" y 4"
- Tubería PVC blanca de $\frac{1}{2}$ "
- Uniones y reducciones de PVC
- Válvulas de globo
- Llave de paso
- Masilla rally
- Cable de calentamiento (5 metros)
- Termocupla
- Circuito
- Cargadores de 12 V
- Listones de madera 4x3 (4 metros)

Se diseñó una nueva configuración de reactor, la cual consistió en un híbrido entre un reactor metanogénico escalonado (RME), que hace referencia a la diferencia de diámetro que existe dentro del biorreactor, en este caso teniendo 3 compartimentos de diferentes diámetros y el reactor de lecho estructurado (ASTBR), que se basa en las espumas de polietileno de baja densidad, las cuales tienen la función de fijar la biomasa, esto con el fin de trabajarlo en una sola etapa, para que este sea más eficiente y la producción de biogás sea mayor, en el **anexo A** se encuentran todos los planos detallados del prototipo de biorreactor híbrido anaerobio, cabe añadir que las dimensiones de este biorreactor se realizan a escala laboratorio y teniendo en cuenta estudios desarrollados anteriormente con estas configuraciones. Los materiales que se utilizaron para la construcción del biorreactor híbrido, fueron tubería de PVC color naranja de 1 $\frac{1}{2}$ ", 2" y 4" para las cavidades inferior, media y superior respectivamente, tubería de PVC blanca de $\frac{1}{2}$ " para la salida del biorreactor, posteriormente se utilizaron las uniones y reducciones de PVC para el camino de entrada al reactor, para cada salida se ubicaron 3 válvulas de globo, en los 3 compartimientos mencionados anteriormente, resina epóxica para evitar fugas, una resistencia de calentamiento o cordón, para mantener temperatura constante en todo el biorreactor, con su respectiva termocupla, para así lograr monitorear y controlar la temperatura, para el circuito y la termocupla se utilizaron los cargadores de 12 V como fuente de energía, en el **anexo B** se encuentra de forma detallada,

⁵² MEEGODA, Jay N., et al. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion.

todo lo relacionado con el monitoreo de temperatura y por último 4 metros de listones de madera de dimensiones 4x3, los cuales se cortaron y fueron utilizados como soporte del biorreactor.

2.1.3 Ensamblaje y acople. Para empezar, se realizaron las mediciones respectivas de los tubos de PVC, dependiendo del diámetro y de la altura necesaria para cada una de las piezas, y compartimentos que se tienen en el biorreactor, posteriormente se hizo el corte de las piezas con un orificio en el centro, en las cuales estaría ubicada la válvula correspondiente para cada una de las tuberías naranjas, esta estaría pegada con la resina epóxica. El primer compartimento o la parte inferior del biorreactor, tiene un tubo PVC de $1\frac{1}{2}$ " y la válvula correspondiente a la purga, la parte intermedia cuenta con una tubería de 2", y al igual que la parte inferior, cuenta con una válvula de globo intermedia, y finalmente la parte superior, que es la de mayor longitud, con una tubería de PVC de 4" y cuenta con la tubería de $\frac{1}{2}$ ", la cual es denominada como salida del reactor o efluente, por último, se hizo el acople de las tuberías de PVC con las uniones y reducciones, dependiendo del diámetro que se necesitó, utilizando pegamento para PVC, lo que permitió obtener el biorreactor híbrido como se muestra en la ilustración 12.

Ilustración 12. Biorreactor híbrido

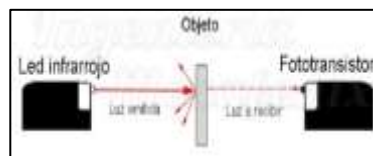
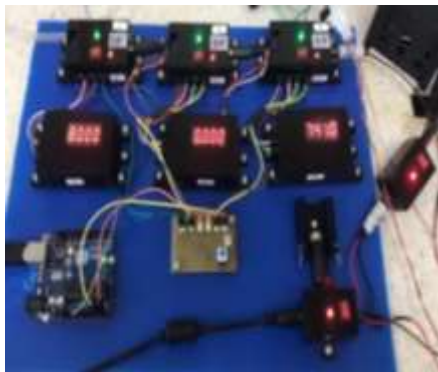


Fuente: *Elaboración propia*

2.1.4 Verificación de fugas. En última instancia, se tienen los listones de madera que fueron utilizados para la construcción de la base, en la cual se ubicó el reactor, se hicieron las pruebas necesarias con agua para saber si existían o no fugas, en caso de que hubiera presencia de fugas, era necesario desocupar el reactor y reforzar con silicona gris o con resina epóxica, en caso de que no existiera presencia de fugas, se procedía a la instalación de la termocupla, el circuito y el cable de calentamiento, que iba ubicado alrededor de todo el biorreactor, independiente de la diferencia de diámetro que existe a lo largo de este, cumpliendo con todo lo anterior se llenó con agua el biorreactor y se hizo la prueba de cada uno de los elementos instalados. Es necesario aclarar que, en caso de existir fugas, no se puede proceder a realizar el ensayo de trazadores, puesto que este tendría afectaciones y no se podría determinar el comportamiento hidráulico del biorreactor de manera adecuada.

2.1.5 Ensayo de trazadores. Para la realización de este ensayo, es necesario utilizar un sensor de densidad óptica, el cual fue desarrollado por Jorge Marroquín⁵³, este sensor está compuesto por un led infrarrojo que mide la densidad óptica de las microalgas, por lo que se decide utilizar un trazador de color verde, que se caracteriza por ser inerte y está compuesto por anilina, una fotocelda y un fototransistor o fotorresistencia, como se puede observar en la ilustración 13, cabe aclarar que la fuente de energía se da por medio de corriente de 5V, la cual se convierte en 12V. El led infrarrojo se encarga de emitir una luz, la cual va a ser recibida por la fotocelda y posteriormente recibida o absorbida por el fototransistor. Cuando existe una sustancia incolora, la luz es absorbida en un 100% por la fotorresistencia, pero cuando hay presencia de una sustancia coloreada, en este caso el trazador verde la luz absorbida por la fotorresistencia va a ser mucho menor. Cabe resaltar que el sensor de densidad óptica se ubicó a la salida del biorreactor.

Ilustración 13. Sensor de densidad óptica

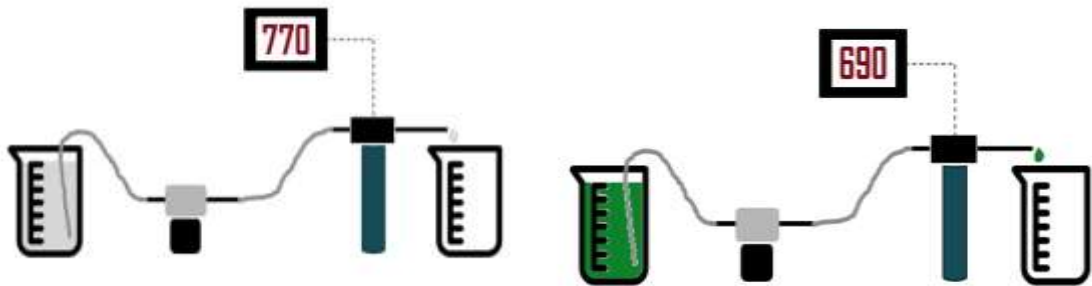


Fuente: Elaboración propia

Para el verificar el funcionamiento del sensor de densidad óptica se realizó una prueba que consistió en dos etapas la primera dejando pasar solo agua y la segunda dejando pasar el trazador seleccionado (colorante verde) como se puede observar en la ilustración 14.

⁵³ Marroquín F, Jorge. Desarrollo de biorreactores controlados aplicables al estudio de cultivos de microorganismos de interés comercial. Tesis para optar por el título de Licenciado en Química. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C. 2018. p. 36.

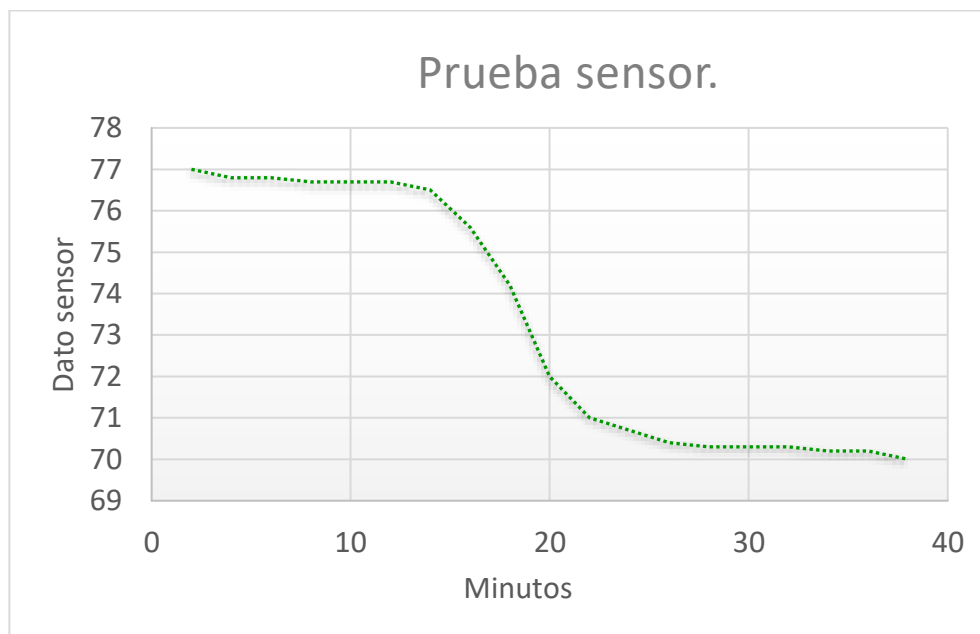
Ilustración 14. Calibración del sensor con agua y trazador verde



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la ilustración presentada, la señal máxima en cuanto se deja pasar solo agua es de 77, y la señal máxima correspondiente al paso del trazador verde, corresponde a 70, esto se puede observar de manera detallada en la gráfica 1 que se presenta a continuación.

Gráfica 1. Calibración del sensor



Fuente: Elaboración propia

Según lo expuesto por autor Sergio Pérez⁵⁴, se realizó una prueba de sensores, en la cual se realizaron varias diluciones de colorante con diferentes volúmenes (200,

⁵⁴ Pérez Peña, Sergio Alejandro. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR), Tesis de pregrado. Universidad de América. 2020. Pg. 49

100, 50 y 10 veces diluido), esto para poder determinar que a mayor concentración de colorante en el agua, menor iba a ser la señal medida por el sensor, ya que la cantidad de luz adsorbida por el sensor es menor, por lo que se escogió la solución 10 veces diluida para realizar el ensayo de trazadores.

Inicialmente se preparó una muestra diluida 10 veces, es decir, 10 mL de colorante en un balón de 100 mL y se aforó con agua destilada, se hizo un pulso de colorante verde de alimento (5 mL), que es una sustancia que no afecta en nada el interior del reactor y puede hacer el recorrido dentro del mismo, este pulso se hizo por medio de una manguera y los 5 mL se midieron con una jeringa de 5 mL. Posteriormente se tomaron datos durante 39 horas, lo que cubre el TRH teórico mínimo que son 36 horas, en la salida del reactor se colocó un sensor de densidad óptica, que fue el que reconoció la presencia del trazador, generando una respuesta (señal), la cual fue variando y registrándose en el programa Telak, acto seguido se tomaron todos los datos registrados y se estudiaron con detalle en el **anexo D**.

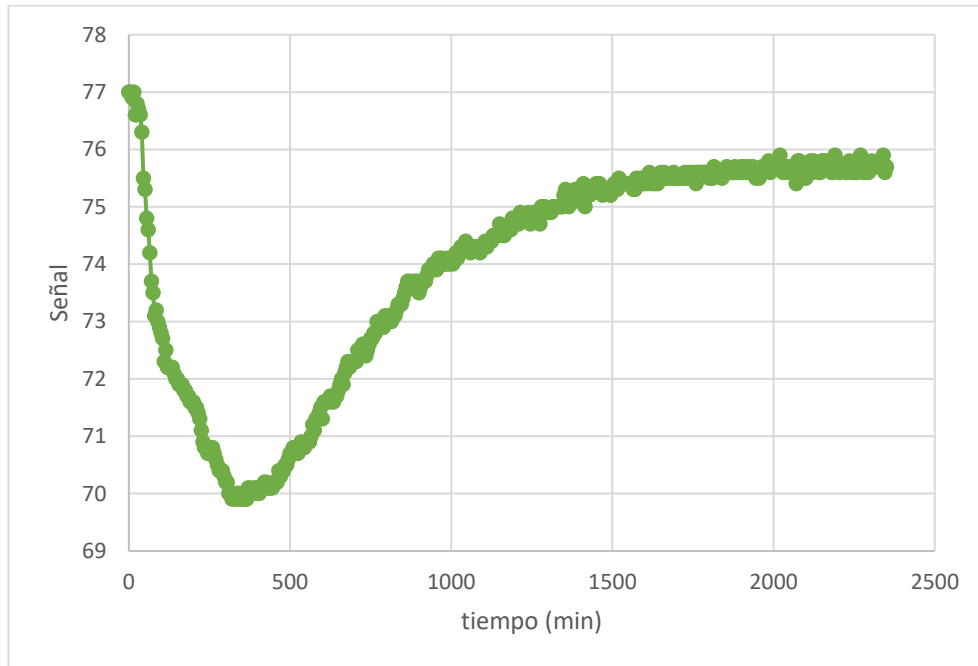
Los elementos que se utilizaron para poder llevar a cabo la inyección (pulso) del trazador, el circuito necesario para el funcionamiento de la bomba y el programa TELAK en donde se registraron cada uno de los datos, obtenidos a lo largo del tiempo. Cabe mencionar que, para la realización del ensayo de trazadores, fue necesario utilizar la bomba peristáltica diseñada y desarrollada por la Universidad Antonio Nariño, estas bombas están compuestas de piezas de plástico impresas en una impresora 3D, una manguera siliconada y puntas de plástico desechables, en el **anexo C**, se explica con detalle el funcionamiento del programa TELAK, sensor de densidad óptica y la importancia del uso de la bomba peristáltica.

2.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS OE1

A continuación, se muestran las gráficas 2 y 3 obtenidas por el programa Telak, antes y después de ajustar los datos, se evidenciaron cada uno de los cálculos realizados por medio de las ecuaciones utilizadas en el libro de Levenspiel⁵⁵, las cuales se presentan en el **ANEXO D** y posteriormente se analizó cada uno de estos resultados obtenidos para el biorreactor híbrido.

⁵⁵ Levenspiel, Octave. Tracer technology, fluid mechanics and its applications. 1998.

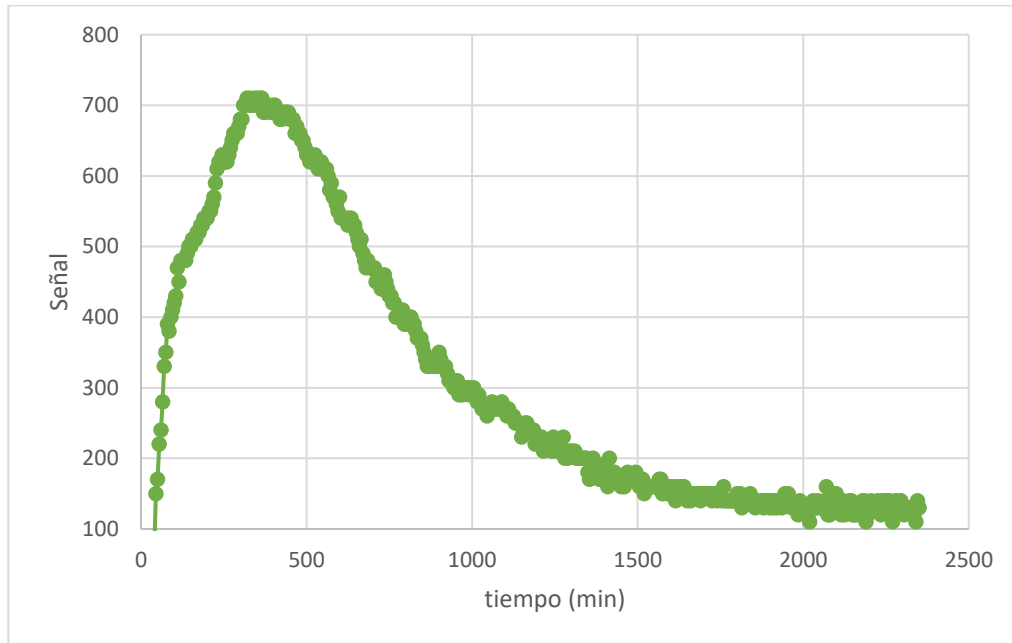
Gráfica 2. Estímulo-respuesta (datos sin ajustar)



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2, se pueden observar los datos sin ajustar, los cuales fueron obtenidos por el programa TELAK, donde en el eje x se tiene el tiempo de residencia, es decir, el tiempo total durante el cual el trazador estuvo dentro de biorreactor, y en el eje y se tiene la señal percibida por el sensor de densidad óptica, teniendo en cuenta el comportamiento de la gráfica, se puede determinar que el trazador empieza en 77, correspondiente al tiempo 0 y el pico máximo corresponde a 70, el cual se refiere al tiempo de máxima concentración dentro del biorreactor, empezando a disminuir al pasar del tiempo, lo que nos permite colegir, que el trazador está saliendo poco a poco hasta llegar a un punto muy cercano al inicial, en este caso la señal llega a 76, lo que quiere decir, que hubo una pérdida mínima del trazador dentro del biorreactor. En la gráfica 3 que se presenta a continuación, se presenta el mismo comportamiento, el ajuste de datos se hace para poder asimilar el comportamiento del biorreactor a un reactor de mezcla completa (CSTR) y llegando al cero, es decir que se desprecian los primeros datos, ya que no influyen como tal en el ensayo de trazadores.

Gráfica 3. Estímulo-respuesta (datos ajustados)



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con Levenspiel⁵⁶, existe una manera donde la distribución de las concentraciones en el tiempo, permiten hacer una aproximación visual acerca del reactor en estudio, este comportamiento puede ser el de un reactor flujo pistón o como un reactor con mezcla completa. La distribución tiende a parecerse a una campana de Gauss, se puede decir que hay una combinación de efectos, aunque por simetría de dicha campana, cuanto más pequeña es la desviación estándar de dichas mediciones, más angosta será la campana, lo cual indica que hay predominio en flujo pistón, y si la desviación crece y la campana se hace más plana entonces, hay una combinación de efectos en flujo pistón y del flujo en mezcla completa. De acuerdo a esto tenemos que cuando las distribuciones en el tiempo son asimétricas, el comportamiento del reactor, tenderá a parecerse a un flujo de mezcla completa, es decir, menos se acercará a un reactor flujo pistón. Haciendo una comparación con las curvas que se encuentran en la bibliografía, se puede concluir que el comportamiento del biorreactor híbrido, es tanto de mezcla completa, como de flujo pistón. Cabe añadir que, de acuerdo con los cálculos realizados, también se logró obtener el número de tanques en serie CSTR, arrojando como resultado igual a 1,829, es decir aproximadamente 2 tanques CSTR, estos cálculos se encuentran en el **anexo B**. A continuación, en la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de trazadores.

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 48.

Tabla 3. Resultados ensayo de trazadores

Parámetro	Biorreactor híbrido
Caudal	6,0 mL/min
TRH	12,34 h
TRH experimental	13,91 h
Numero de tanques en serie	1,829

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a resultados obtenidos en la tabla anterior y teniendo en cuenta lo que dice Levenspiel⁵⁷, el tiempo de retención hidráulico experimental, al ser mayor que el tiempo de retención hidráulico teórico, evidencia las dificultades que tiene el trazador para hacer el recorrido dentro del biorreactor, es decir que existió algún factor extraño, como alguna fricción dentro del biorreactor o alguna dificultad en la tubería, que no le permitió fluir en su totalidad y sin problemas, en la ecuación 1 muestra cómo se halló el tiempo de retención hidráulico experimental. Al tener un tiempo de retención hidráulico experimental mayor al teórico, se hace necesario indicar, que existe algún factor interno o externo que está afectando el ensayo de trazadores, entre los factores internos, se encuentra la presencia del lecho estructurado, la presencia del lodo granular, o simplemente que existe alguna fricción en la tubería, que afecta el recorrido del trazador en su 100% dentro del biorreactor; El factor externo, podría ser la bomba peristáltica, ya que no se tiene un caudal preciso y podría verse la fluidez del trazador dentro del biorreactor.

Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulico

$$\frac{C * t}{C_{\text{inicial}}} = \frac{119936650}{143640} = 834,980 \text{ min} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 13,91 \text{ h}$$

Fuente: Elaboración propia basado en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

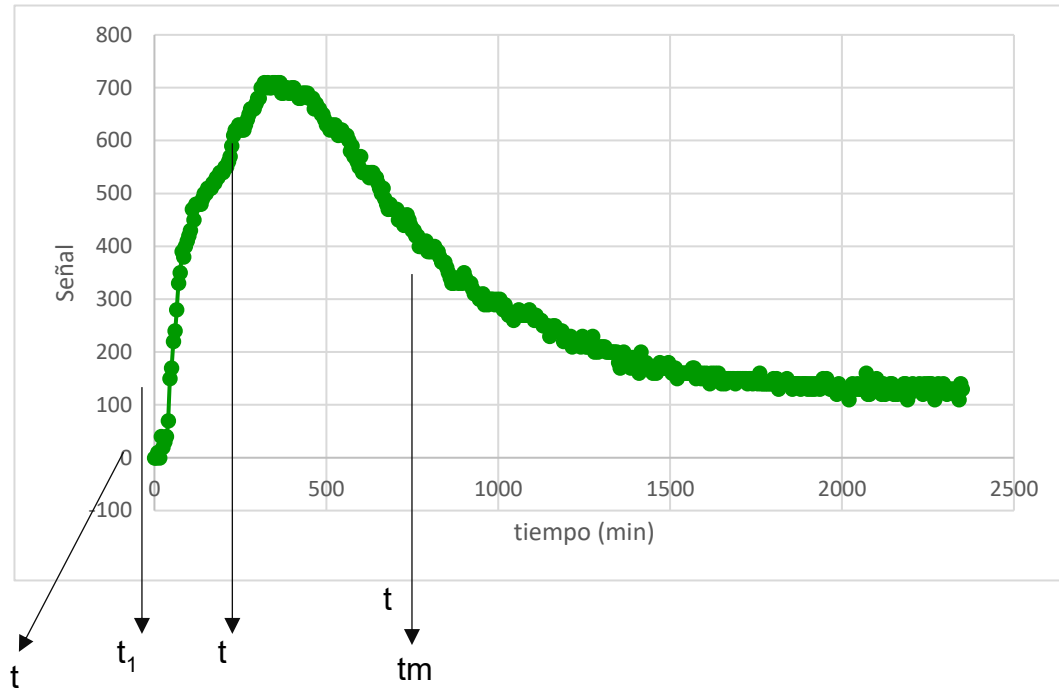
Como se puede observar en la tabla 3, el TRH experimental es mayor al TRH teórico, lo que indica que el biorreactor tiene zonas muertas, es decir, que el volumen del biorreactor no se está aprovechando completamente, similar a lo que sucede en el estudio realizado por los autores Germán Giacomán y Javier Frías⁵⁸ que en su artículo, explican que, al no realizar una inyección puntual del trazador, aumenta el volumen de la zona muerta del reactor, donde se relaciona el perfil de velocidad del reactor, el cual es considerado un factor de dispersión, por lo que el

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 57.

⁵⁸ Giacomán Vallejos, German & Tuyín, Javier & Arlene, Flor & Franco, Hurtado & Peraza, Víctor & Novelo, Roger. Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. 2003.

tiempo de retención hidráulica aumenta teniendo un caudal bajo. De acuerdo a la gráfica obtenida en el ensayo de trazadores, y después de hacer el ajuste de datos, se puede obtener la gráfica 4, donde se pueden observar de manera detallada cada uno de los parámetros expuestos por Levenspiel.

Gráfica 4. Parámetros basados en Levenspiel



Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica, se señalan cada uno de los parámetros que se presentan en la tabla. A continuación, se muestra la tabla 4, donde se muestran cada uno de los parámetros que se analizan después de obtener los datos.

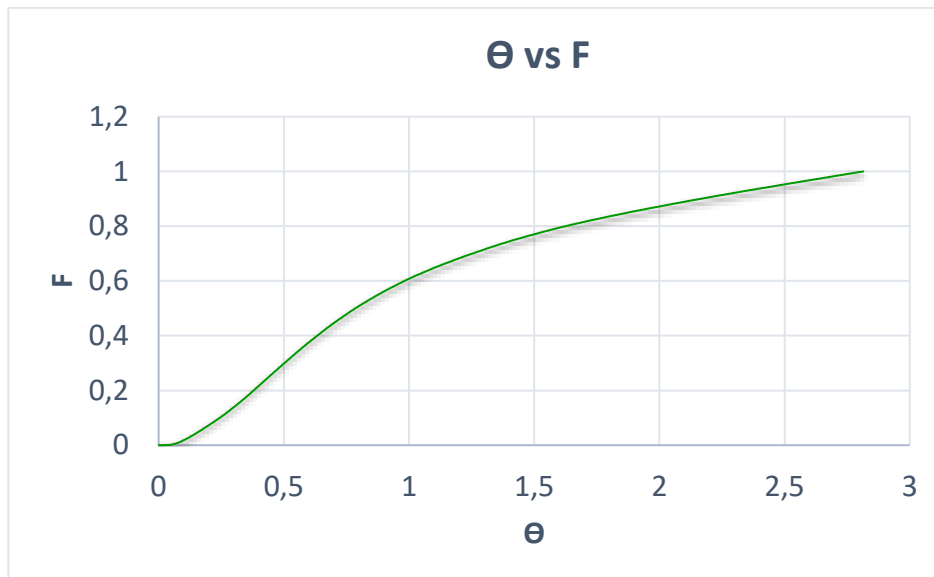
Tabla 4. Parámetros del ensayo de trazadores

Descripción	Parámetro	Unidades
Desde que se aplica el trazador hasta que este aparece en el efluente	tiempo inicial (t_i)	min
Corresponde al paso del 10% de la cantidad total del trazador	t_{10}	min
Corresponde al tiempo para el cual se presenta la máxima concentración en el reactor	tiempo modal (t_p)	min
corresponde al paso del 50% del trazador	tiempo mediano	min
Tiempo teórico de retención	t_0	min

Fuente: Elaboración propia con base en los parámetros expuestos por Levenspiel

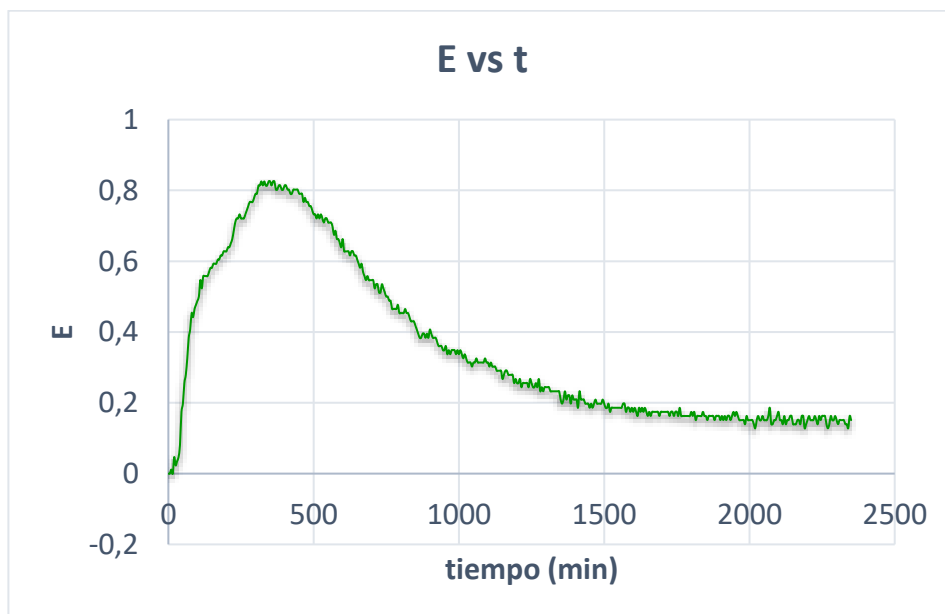
Después de realizar todos los cálculos pertinentes en el ensayo de trazadores, los cuales se encuentran explicados de manera detallada en el **anexo B**, es posible presentar y hacer un análisis de las curvas F y E, obtenidas por medio de estos, las cuales se pueden observar a continuación en las gráficas 5 y 6 respectivamente.

Gráfica 5. Curva F (Sumatoria del tiempo medio de retención)



Fuente: Elaboración propia

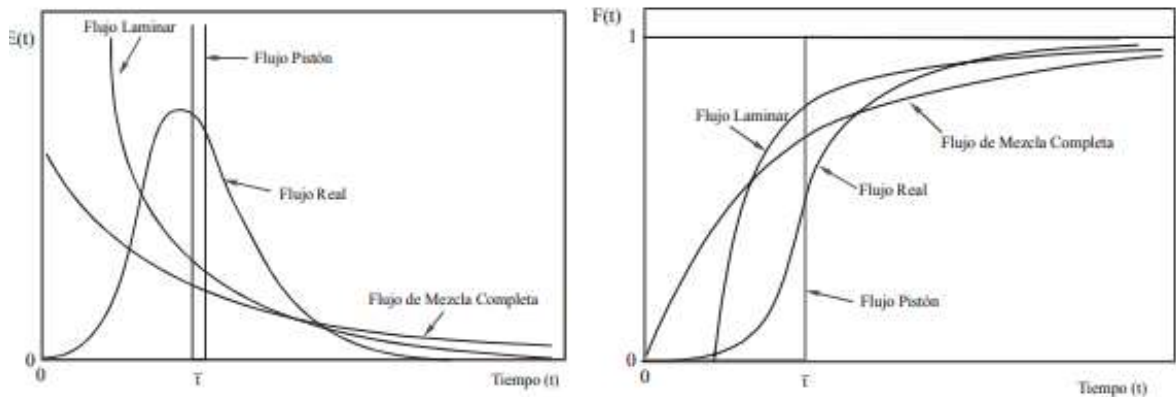
Gráfica 6. Curva E (Espectro de densidad)



Fuente: Elaboración propia

La curva F, se relaciona con la suma del tiempo de retención medio, cuando se adiciona el trazador de manera continua, la Curva E, hace referencia a la inyección puntual y se relaciona con el tiempo que permanece el fluido dentro del biorreactor. Estas funciones son probabilísticas y estadísticas y dependen una de la otra, Θ es la normalización de tiempo, que es el cociente del tiempo inicial y el tiempo de retención hidráulico experimental. Es necesario aclarar que el valor máximo que va a tener el eje y , es igual a un tanto, en la curva E como en la curva F, esto es posible apreciarlo en las dos gráficas presentadas anteriormente. A continuación, se presenta la ilustración 15, donde las gráficas obtenidas por Giacomán⁵⁹, muestran el estudio del comportamiento de un reactor flujo pistón, de acuerdo con las gráficas obtenidas en el ensayo de trazadores y comparando con estas, es posible asemejar que el comportamiento tanto de la curva F, como de la curva E, son de flujo real, y según lo expuesto por el autor mencionado, el flujo real, hace referencia a un conjunto de tanques conectados en serie, estos representan el comportamiento de mezcla completa y a su vez, describe el comportamiento hidráulico de un flujo pistón, por lo que se puede decir que el comportamiento del biorreactor, es una combinación de flujo de mezcla completa y flujo pistón, sin dejar a un lado que al tener 2 reactores conectados en serie, el comportamiento es en su mayor parte flujo de mezcla completa.

Ilustración 15. Curva E y curva F



Fuente: Giacomán (2003)

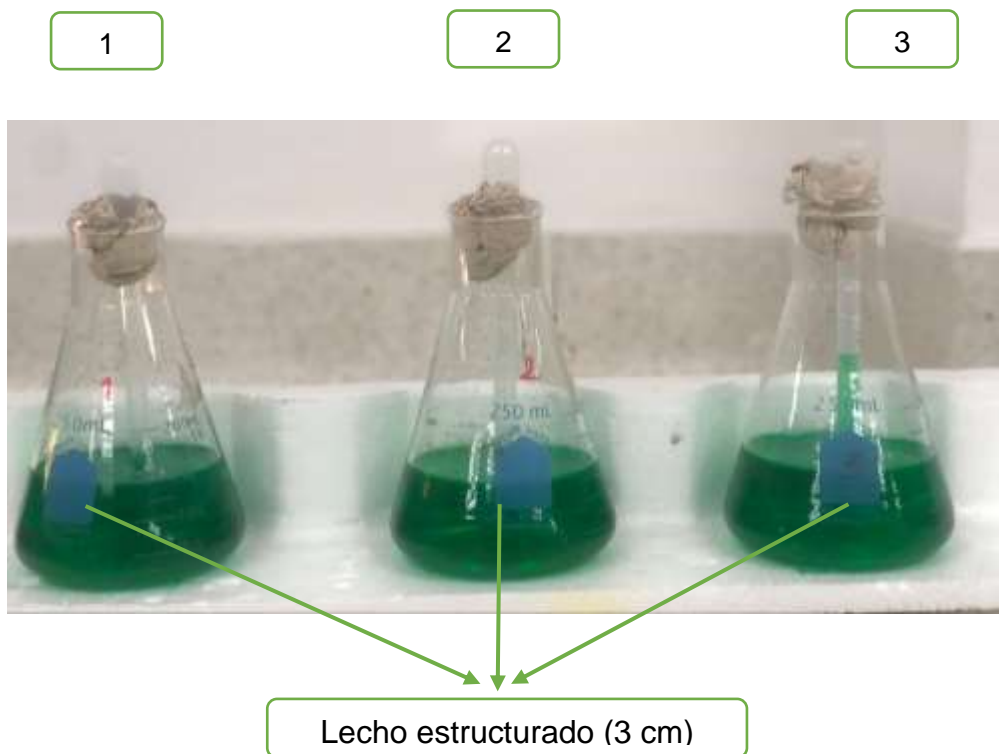
⁵⁹ Giacomán Vallejos, German & Tuyín, Javier & Arlene, Flor & Franco, Hurtado & Peraza, Víctor & Novelo, Roger. Análisis de la hidrodinámica de un reactor de flujo pistón. 2003.

3. OE 2 IDENTIFICAR LA INFLUENCIA DEL LODO GRANULAR Y DEL LECHO ESTRUCTURADO EN EL TRAZADOR SELECCIONADO

3.1 METODOLOGÍA OE 2

3.1.2 Ensayo de adsorción del lecho estructurado. Este ensayo de adsorción, consistió en preparar una solución madre para cada una de las diferentes diluciones que se realizaron, donde la 1 es la dilución menor, 2 la dilución media y 3 la dilución mayor, estas diluciones, se realizaron con colorante verde (0,5 mL, 1 mL y 1,5 mL) respectivamente y se aforó con agua destilada, en un balón aforado de 100 mL cada una, se tomó una espuma igual a la de la base que estaba dentro del biorreactor, se cortaron 3 segmentos de 3 cm cada uno y se ubicaron cada uno de estos, en los tres erlenmeyers, los cuales contenían la solución madre, como se muestra en la ilustración 16. Este ensayo se realizó, con el fin de saber si existía adsorción por parte del lecho estructurado, para así determinar si llegaba afectar el ensayo de trazadores o no, la absorbancia se midió en el espectrofotómetro a 680 nm, este ensayo se hizo por triplicado, el primer ensayo se hizo durante 4 días, el segundo ensayo durante 3 días y el tercer ensayo tuvo una duración de 9 días, cabe añadir que la medición se hacía cada 24 horas.

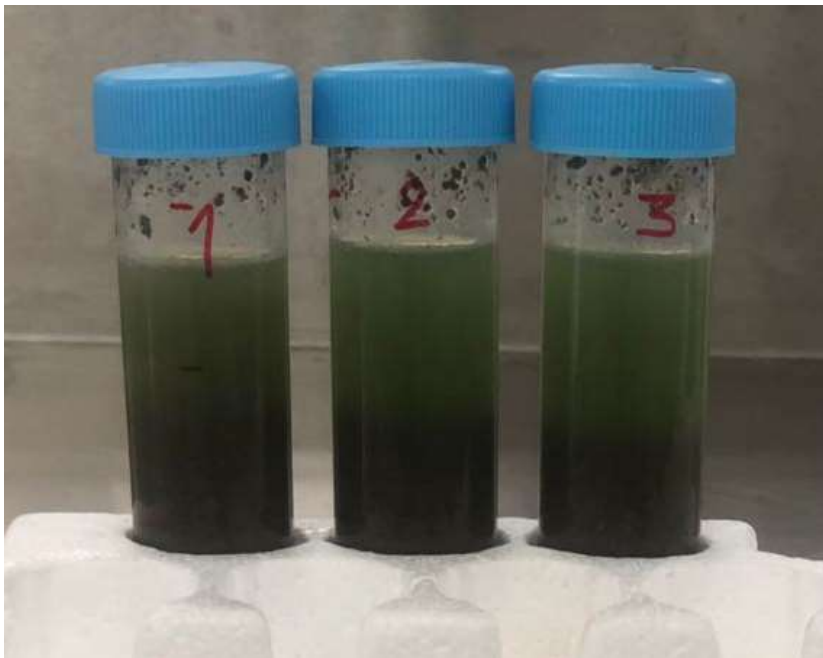
Ilustración 16. Ensayo de adsorción del lecho estructurado (1 dilución menor, 2 dilución media y 3 dilución mayor)



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Ensayo de adsorción del lodo granular Para determinar la adsorción del lodo granular, inicialmente se prepararon 3 soluciones madre, con diferentes diluciones iguales a las del ensayo de adsorción del lecho estructurado, es decir, 0,5 mL, 1 mL y 1,5 mL de colorante verde respectivamente, donde 1 es la dilución menor, 2 es la dilución media y 3 es la dilución mayor y se afora con agua destilada, en un balón aforado de 100 mL para cada una, en 3 tubos falcón de 50 mL, se adicionaron 15 mL de lodo granular de cada una de las soluciones madre, hasta llegar a 45 mL en cada uno, como se puede observar en la ilustración 17. Posteriormente, se dejaron estas muestras en un lugar oscuro, y por último, se midió la absorbancia en el espectrofotómetro a 680 nm. Al igual que en el ensayo anterior, se hizo con la intención de saber, que tanto podría afectar el lodo granular en el ensayo de trazadores, y en este mismo sentido por triplicado, los ensayos se realizaron cada 24 horas, los datos de la dilución menor se tomaron durante 3 días, la dilución media se realizó durante 4 días y, por último, la dilución mayor durante 9 días.

Ilustración 17. Ensayo de adsorción del lodo granular (1 dilución menor, 2 dilución media y 3 dilución mayor)



Fuente: Elaboración propia

3.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ADSORCIÓN DEL LECHO ESTRUCTURADO

En el ensayo de adsorción del lecho estructurado, se debe tener en cuenta cuál es la factibilidad de realizar el ensayo de trazadores, en él, o si es necesario hacerlo sobre el reactor. Es importante recalcar, que debido a que el reactor debe tener por ser un híbrido, diámetro variado y lecho estructurado, esto con el fin de saber cuál

es la influencia del lecho estructurado, en el funcionamiento del biorreactor y en el ensayo de trazadores. Además, que el principal funcionamiento del lecho estructurado, será la fijación de biomasa con el fin de remover la materia orgánica del proceso. A continuación, se muestra la gráfica 7, obtenida como resultado del ensayo de adsorción del lecho estructurado de la dilución menor, realizada durante 4 días, la dilución media, realizada durante 3 días y por último la dilución mayor realizada por 9 días, pruebas que arrojaron mayor número de resultados, los cuales nos permitieron tener confiabilidad en alta proporción, relacionada con el análisis de estos y la estabilización del reactor.

Gráfica 7. Ensayo de adsorción del lecho estructurado



Fuente: Elaboración propia

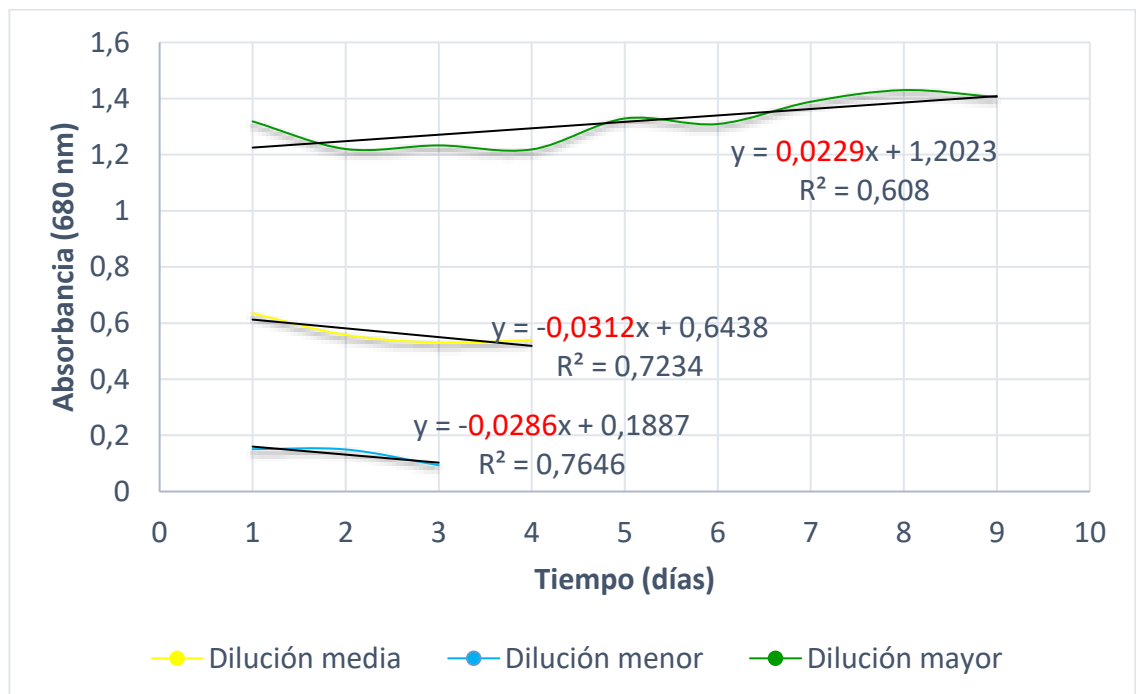
En la gráfica 7, se puede observar que el eje x tiene el tiempo representado en días y en el eje y la absorbancia medida con el espectrofotómetro, donde cada una de las pruebas tiene un tiempo diferente de duración, tal y como se expuso en apartes ya expuestos. A pesar de que las curvas muestran comportamientos completamente diferentes, se puede decir que la adsorción de las espumas, no es significativa por lo que no afecta en lo absoluto el ensayo de trazadores, esto es posible decirlo ya que el valor de la pendiente es casi cero y la variabilidad entre las tres diluciones es mínima, sin embargo, estas espumas de polietileno de baja densidad (lecho estructurado), son de gran importancia para la adhesión y fijación de biomasa dentro

del biorreactor. De acuerdo con el autor Fabián Otalora⁶⁰, quien realizó como proyecto, un ensayo de adsorción lecho estructurado, mediante el método de cromatografía de Lons, donde utilizó como trazador el cloruro de litio, logrando determinar que la adsorción por parte del lecho estructurado, es mínima, lo que es consecuente con los resultados obtenidos en el ensayo de adsorción de este proyecto.

3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO DE ADSORCIÓN DEL LODO GRANULAR

En la gráfica 8, se representa la adsorción del lodo granular, donde se puede observar que al igual que en el ensayo de adsorción del lecho estructurado, el comportamiento de las tres diluciones es diferente, sin embargo, los resultados obtenidos de absorbancia en la diluciones menor y media tienden a decrecer, en la dilución mayor se tiene un crecimiento mínimo, por lo que se puede decir, que la adsorción del lodo, no es significativa en el método del ensayo de trazadores, precisando que la función del lodo granular, es aportar las bacterias metanogénicas, acidogénicas y acetogénicas, las cuales tienen como objetivo el de producir biogás.

Gráfica 8. Ensayo de adsorción del lodo granular



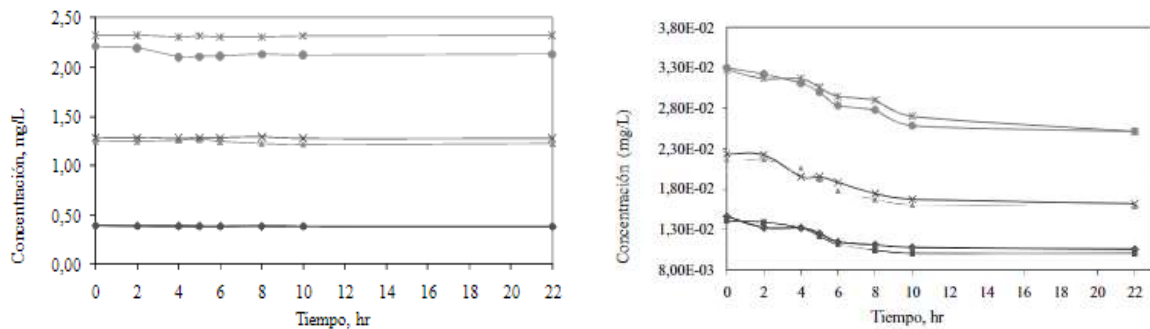
Fuente: Elaboración propia

⁶⁰ Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018.

En atención a esto, se tiene que los resultados obtenidos en diluciones menor, media y mayor de adsorción en lodo granular, nos indican, que este método se puede usar con la seguridad de que no va a afectar el funcionamiento, ni el comportamiento del fluido en el reactor. Si bien es cierto que se pudo observar una adsorción mínima, también es correcto afirmar, que no tiene ninguna influencia en el proceso más que el de aportar las bacterias mencionadas.

De acuerdo a los autores Jhonny Pérez, Nancy Rincón y Nibis Bracho⁶¹ y como se puede observar en la ilustración 18, estos autores realizaron un ensayo de adsorción de diferentes trazadores, como rodamina WT litio y cloruro en contacto con el lodo granular anaerobio, afirmando que las concentraciones de los trazadores, no afectan, ni generan inhibiciones en el tratamiento con el lodo granular anaerobio, lo que es similar a lo que se obtuvo en el desarrollo de este proyecto, donde se demuestra con el ensayo de adsorción, que el lodo granular no afecta el recorrido del trazador dentro del biorreactor híbrido, existiendo adsorción, pero siendo tan mínima que permite despreciarse, al igual que el ensayo realizado con el lecho estructurado (espumas de polietileno de baja densidad).

Ilustración 18. Ensayo de adsorción de trazadores (Cl y Li) con Lodo granular



Fuente: Pérez, 2011

⁶¹Pérez, Jhonny. Rincón, Nancy. Bracho, Nibis. Evaluación de la adsorción de rodamina WT, litio y cloruro en reactores por carga inoculados con lodo anaerobio. Universidad de Antioquia. 2010.

4. OE 3 CARACTERIZAR LA BIOMASA DENTRO DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO, DURANTE LA OPERACIÓN

4.1 METODOLOGÍA OE 3

4.1.1 Inoculación artificial. Inicialmente al dejar recircular el agua sintética residual, la cual simuló el hidrolizado rico en hemicelulosa, proveniente del pretratamiento térmico de la biomasa lignocelulósica, se realizó la inoculación natural, gracias a las bacterias que aportó la melaza, posteriormente se realizó la inoculación artificial, con lodo granular proveniente del tratamiento de aguas residuales de la planta de Postobón, se decidió realizar la inoculación artificial con lodo granular, ya éste que proporciona una mayor conversión de los desechos en metano, una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica, y puede trabajar con altas cargas orgánicas, generando así, un mayor crecimiento de la biomasa. Esta inoculación artificial inducida, se realizó teniendo en cuenta el volumen efectivo del reactor (4443mL), y se determinó la cantidad necesaria en volumen (mL) que se debía agregar, el valor obtenido de lodo granular para adicionar al biorreactor fue de 148,1 mL.

4.1.2 Operación del biorreactor. Para realizar el arranque del biorreactor, inicialmente se preparó agua sintética, la cual simula una alta carga orgánica aplicada, cabe señalar que esta agua residual sintética, solo simula la concentración de DQO, mas no la complejidad del sustrato. Este alimento está conformado por macronutrientes, melaza y micronutrientes que no son necesarios, pero son importantes, puesto que aportan vitaminas y minerales. En la tabla 5, se mencionan cada uno los macronutrientes que se utilizaron para preparar el alimento, y en la tabla 6, micronutrientes, cada uno de los macronutrientes y micronutrientes tiene una cantidad específica necesaria, cabe aclarar que las cantidades cambian de acuerdo con el volumen de alimento o de agua sintética que va a ser preparada.

Tabla 5. Macronutrientes para 6 L de alimento DQO de 4000 mg/L

	Reactivo	Cantidad (g)
Macronutrientes	Melaza	21,76
	Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	4
	Fosfato trisódico (Na ₃ PO ₄)	11,52
	Cloruro de magnesio (MgCl ₂)	2,4
	Sulfato de sodio (NaSO ₄)	13,05

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Micronutrientes para 6 L de alimento DQO de 4000 mg/L

	Reactivo	Cantidad
Micronutrientes	Sulfato de cinc ($ZnSO_4$)	2 mL
	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	2 mL
	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	2 mL
	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	1,92 mL
	$MnSO_4 \cdot H_2O$	1,92 mL
	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	2 mL
	Bicarbonato de sodio	16 g

Fuente: Elaboración propia

El biorreactor inicialmente se empezó a operar sin inocular lodo granular, pero si existió una inoculación natural durante un mes, teniendo un alimento con una DQO de 4000 mg/L, donde se monitorearon diariamente parámetros como pH, caudal y temperatura. Por otra parte, se midió DQO tanto del alimento como del efluente 3 veces por semana. Posteriormente se realizó la inoculación con lodo granular proveniente del tratamiento de aguas residuales de la planta de Postobón, después de haber inoculado se realizaron mediciones durante 24 días tanto de DQO como de sólidos totales, fijos y volátiles. Se midió DQO 3 veces por semana tanto del alimento como del efluente y también se hicieron mediciones de sólidos totales, volátiles y fijos los cuales se dividieron en dos, primero sólidos de la base, es decir, del lecho estructurado solo una vez y segundo sólidos del efluente que al igual que la DQO se realizó 3 veces por semana.

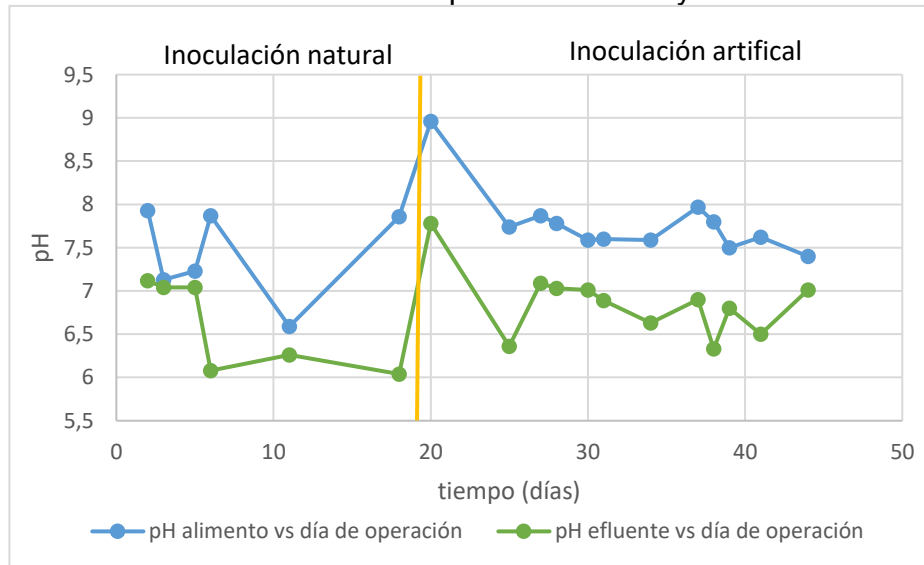
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA OPERACIÓN DEL BIORREACTOR

A continuación, se muestran cada una de las mediciones con los parámetros que fueron monitoreados durante la operación del biorreactor, antes y después de inocular de manera artificial con lodo granular, ya que inicialmente se tiene una inoculación natural, al iniciar la operación del biorreactor solo con el alimento, es decir, el agua residual sintética.

4.2.1 Medición pH. Esta medición de pH, se realizó por medio de un pH-metro, el cual necesitaba previamente una calibración, después de esto, se medía el pH de la muestra necesaria. El pH es una de las mediciones más importantes, por lo que es vital mantener el pH del efluente, en un rango óptimo entre (6,5-7,5), esto con el fin de determinar la producción de biogás, ya que las bacterias que van a ayudar a producirlo son neutrófilas, dicho esto, es posible afirmar que el biogás producido, es rico en metano y va a ser más eficiente a nivel energético, si el pH se encuentra en un rango óptimo, al tener un pH por debajo de 6, quiere decir que el biogás

producido va a ser muy pobre en metano y por ende va a tener menos cualidades energéticas. En la gráfica 9, se puede observar que el comportamiento del pH, tanto del alimento, como el del efluente en la parte izquierda de la gráfica, es muy variable y poco estable, cabe resaltar, que estos datos correspondientes a la parte izquierda de la gráfica, fueron medidos cuando solo se contaba con la inoculación natural del biorreactor. En la parte derecha de la gráfica, se tiene el pH del alimento y del efluente, donde los primeros días, se presenta la estabilización del biorreactor, puesto que ya se había realizado la inoculación artificial y como se puede observar, estos datos tienden a ser casi constantes, es decir que el pH se estabilizó después de pasar por una fase adaptación.

Gráfica 9. Datos obtenidos de pH a la entrada y salida del biorreactor



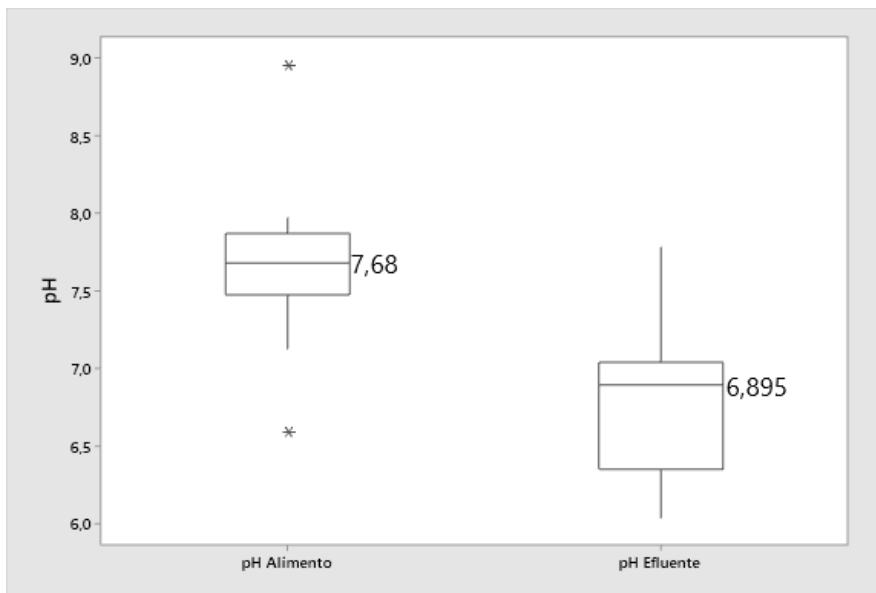
Fuente: Elaboración propia

La medición de pH se realizó durante 44 días, teniendo en cuenta los datos obtenidos en la gráfica anterior, el pH del efluente estuvo dentro del rango óptimo la mayoría de los días, sin embargo, los días que no se logró llegar al pH óptimo, fue debido a que no se le adicionó la cantidad correcta de bicarbonato de sodio, este es considerado un factor externo. En los primeros días donde se tiene un pH muy cercano casi igual del pH del alimento y del efluente se puede decir que las bacterias se encontraban en un estado estacionario por lo que existió un aumento de la concentración de AGV dentro del biorreactor.

A continuación el diagrama de caja 1, permite observar la mediana del pH, tanto del alimento, como del efluente, los valores obtenidos fueron 7,68 y 6,895 respectivamente, donde se tiene que la mediana de ambos valores de pH, está dentro del rango óptimo para la operación del biorreactor, cabe resaltar que el pH del alimento es más alto, ya que se prepara manualmente y se busca tener un pH entre 7 y 8, y el pH del efluente correspondiente a 6,895, se mide en la salida del reactor después de que el fluido ha realizado todo el recorrido dentro del biorreactor.

Sin embargo, en el pH del alimento, se tienen dos puntos extremos, uno muy bajo llegando a un valor de 6,5 y uno muy alto, el cual tiene un valor aproximado a 9, estos datos no son óptimos para la producción de biogás, y se deben a un error en la medición, por lo que es posible despreciar estos datos, ya que, sin ellos la media se comporta de una manera óptima, de acuerdo al rango establecido anteriormente.

Diagrama de caja 1. pH alimento y efluente sin tener en cuenta el tipo de inoculación

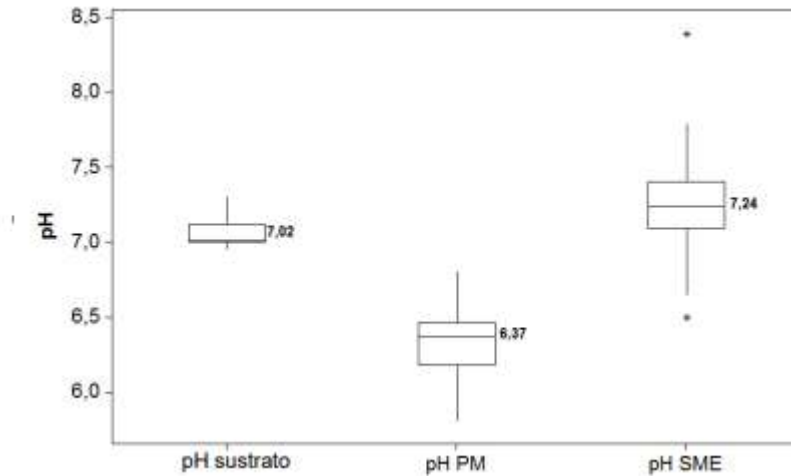


Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados que se puede observar en el diagrama de caja 1 presentado anteriormente se puede hacer una comparación con los datos obtenidos por la autora Jineth Arango⁶² que se muestran a continuación en la ilustración 19 donde se puede observar que el pH medido del sustrato y a la salida del reactor se mantuvo dentro del rango óptimo por lo que se presentó una eficiencia en la producción de metano, aun cuando el pH medido en el punto de medio del biorreactor no fue el mejor.

⁶² Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018.

Ilustración 19. pH sustrato, punto medio y del efluente



Fuente: Arango 2019

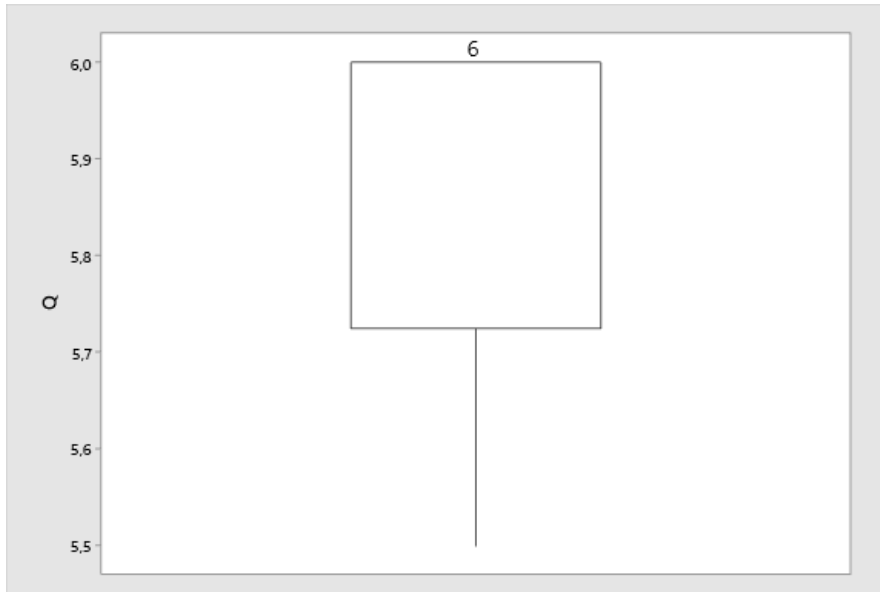
4.2.2 Medición caudal. El caudal es una relación entre el tiempo de retención teórico y el volumen del biorreactor, lo cual se explica en detalle en el **anexo B**. Es importante tener en cuenta esta variable en la entrada del reactor, ya que este valor ayuda a tener una mayor eficiencia energética en el proceso y a evitar fallas en el mismo. Como quiera que si se tiene un valor muy alejado al que se debe tener, los tiempos de retención en el reactor pueden aumentar, y así mismo, la producción de biogás se verá afectada. A continuación, se muestra el diagrama de caja 2 y la tabla 7, contentivos de los resultados obtenidos en la prueba del caudal, para determinar cuál proporcionará los mejores resultados, se puede ver la dispersión o desviación estándar de los datos, los cuales se concentran en 6 mL/min.

Tabla 7. Datos obtenidos en la medición del caudal durante los días de operación

Q	5,8	5,8	5,8	6	5,5	6	6	5,5	6	5,5	6	6	6	6	5,8	5,8	6	6
Día de operación	2	3	5	6	11	18	20	25	27	28	30	31	34	37	38	39	41	44

Fuente: Elaboración propia

Diagrama de caja 2. Caudal

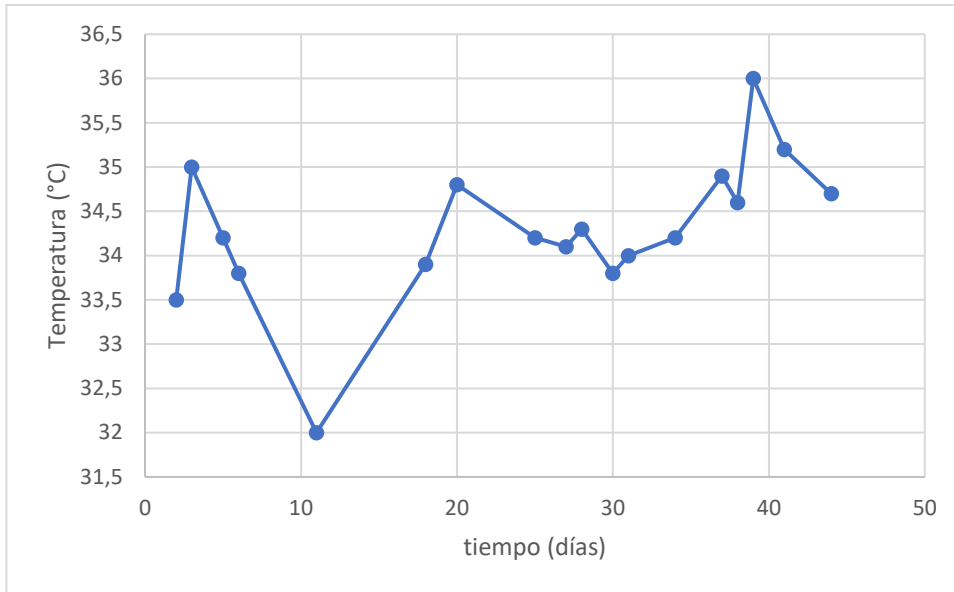


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el diagrama de caja 2, las mediciones del caudal durante los 44 días de operación, tuvieron una mediana de 6 mL/min, muy similar al caudal teórico, que era de 6,171 mL/min, lo que quiere decir, que el volumen útil del reactor está siendo aprovechado totalmente.

4.2.3 Medición temperatura. Este es un parámetro importante en la operación del biorreactor híbrido anaerobio, ya que influye en la velocidad de crecimiento de los microorganismos, estos son considerados mesófilos y tienen un rango de temperatura (20-40°C), en ese orden de ideas, para determinar una temperatura exacta que se encuentre en este rango, se ha tomado en cuenta la teoría en donde se ha encontrado un valor de temperatura óptimo, para que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera, y que han generado una producción de biogás mucho más elevada. Esta temperatura se determinó en 35°C, temperatura que se mantendrá en este valor, gracias a un cable de calentamiento, que va a rodear el reactor, desde la parte inferior, hasta la parte superior del mismo, por lo que es importante monitorear la temperatura. A continuación, en la gráfica 10 se muestra el comportamiento de la temperatura, durante los 44 días de operación, sin separar los datos que se obtuvieron con la inoculación natural y artificial.

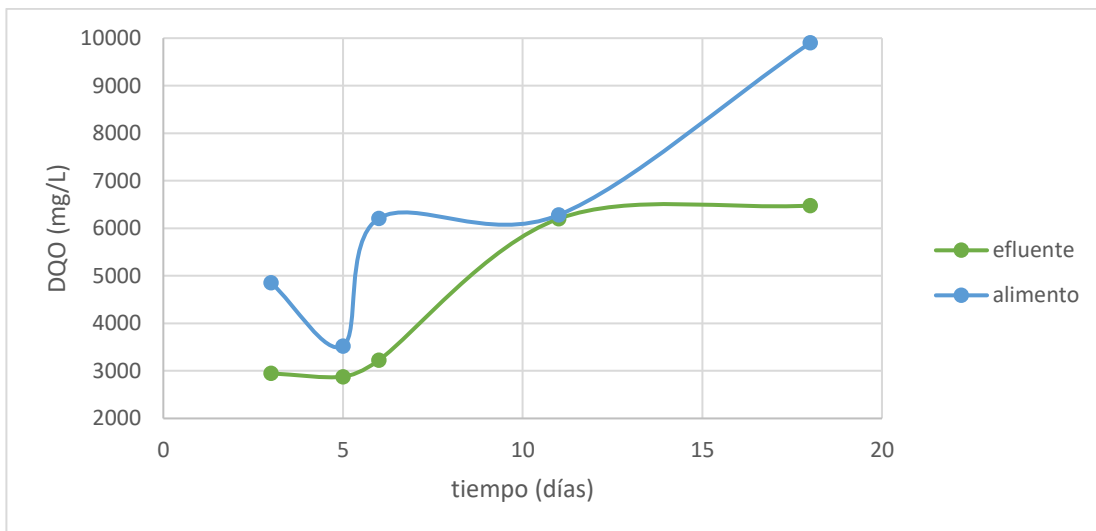
Gráfica 10. Temperatura durante días de operación



Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Medición DQO. Se realizó la medición de DQO, tanto del alimento, como del efluente con inoculación natural y artificial, es necesario hacer la medición de DQO del alimento, las cual nos permite observar más adelante, el porcentaje de remoción. El procedimiento que se realizó para la medición de DQO, se puede observar en el **anexo D**.

Gráfica 11. DQO inoculación natural

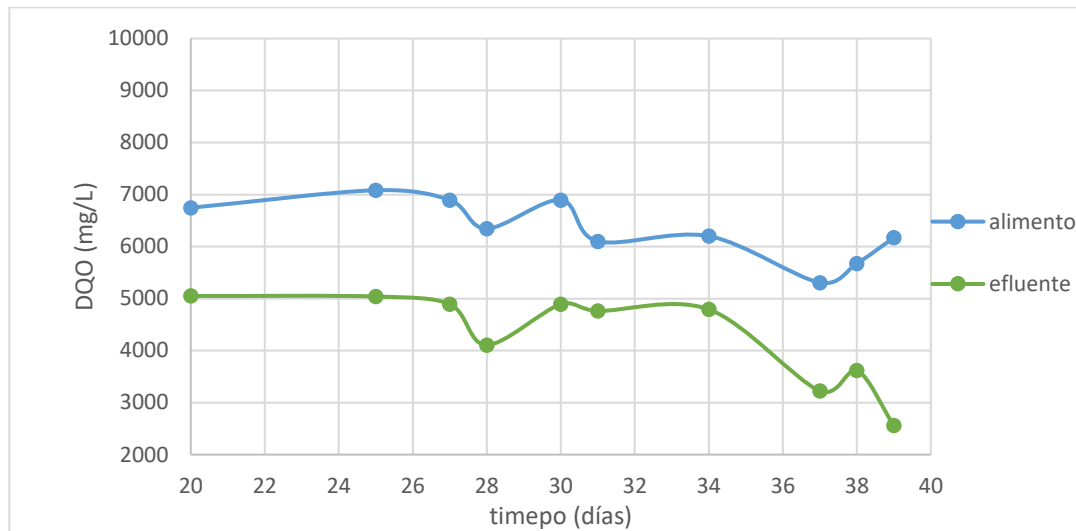


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 11, se puede observar que el comportamiento no es constante, es decir, no existió fase de adaptación. En algunos puntos como en el día 5 y en el día 12, fue mínimo el cambio que se presentó en el valor de DQO del alimento y del efluente, por lo que el porcentaje de remoción fue mínimo, esto fue ocasionado por diferentes factores como: falta o exceso de algún reactivo (macronutriente o micronutriente), manejo de las muestras, entre otros.

En la gráfica 12, se muestra el comportamiento de la DQO a lo largo del tiempo, después de haber realizado la inoculación artificial.

Gráfica 12. DQO inoculación artificial



Fuente: Elaboración propia

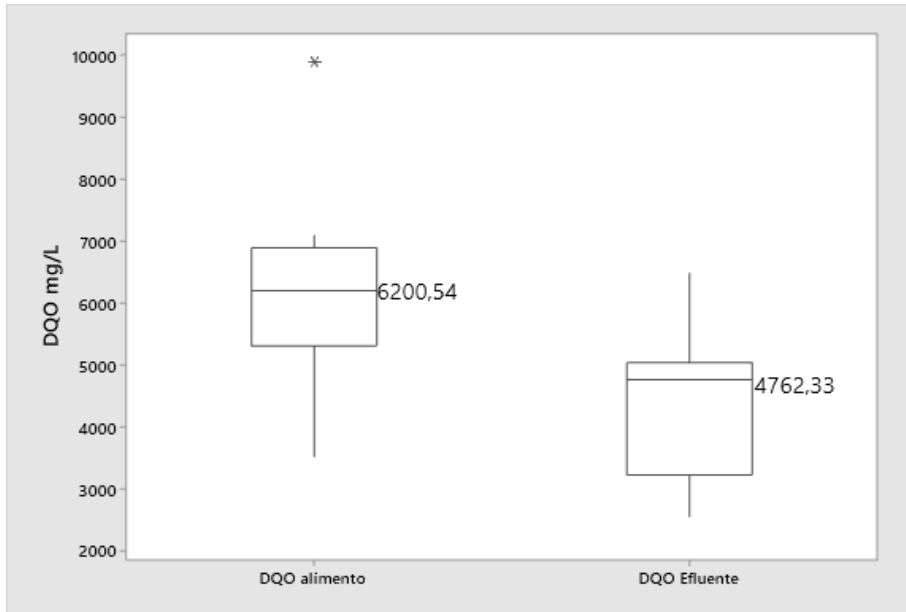
Después de realizar la inoculación artificial, se efectuó el monitoreo continuo de la medición de la DQO, como se puede observar en la gráfica 8, presentando un buen comportamiento al agregar el lodo granular, ya que hubo adaptación de los valores, tanto del alimento, como del efluente, los cuales se mantuvieron (5000-7000g/L) y (2500-5000g/L) respectivamente, y se logró un mayor porcentaje de remoción. Cabe señalar que, para determinar el porcentaje de remoción, se utilizó la ecuación 2, esta representa la diferencia que existe, entre el valor obtenido de DQO del alimento y el valor de DQO del efluente.

Ecuación 2. Determinación del porcentaje de remoción

$$\frac{\text{DQO alimento} - \text{DQO efluente}}{\text{DQO alimento}} * 100$$

Fuente: Elaboración propia

Diagrama de caja 3. DQO combinada de la inoculación natural y artificial

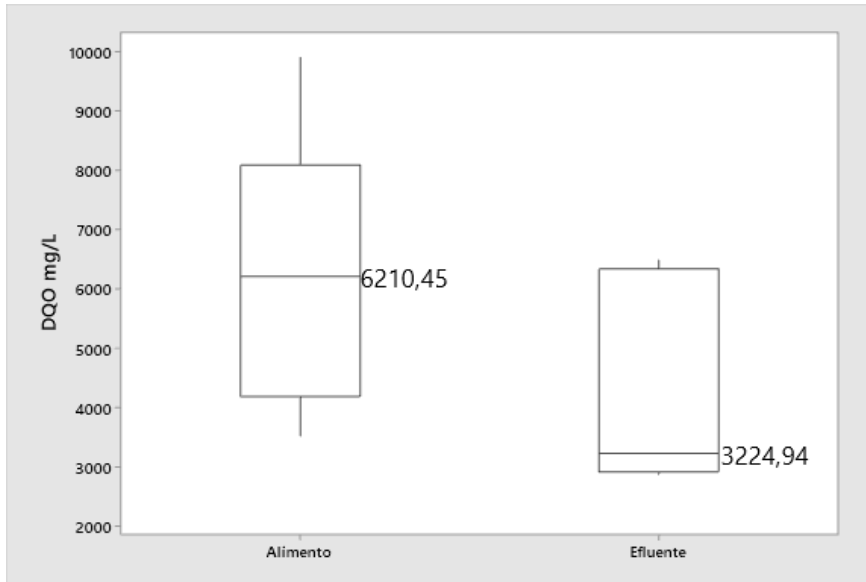


Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de caja 3, se puede observar que el alimento tuvo una mediana de 6200,54 mg/L, sin embargo, hay un dato demasiado alto hasta llegar a un valor de casi 10000 mg/L, el cual se desprecia, ya que se encuentra muy lejano al resto de datos, la mediana del efluente 4762,33 mg/L en la operación del biorreactor, cabe resaltar que los datos obtenidos en este diagrama, están combinados con los de inoculación natural e inoculación artificial.

A continuación, en los diagramas de caja 4 y 5, se puede observar la mediana, y la desviación de los datos de la inoculación natural y artificial respectivamente.

Diagrama de caja 4. DQO Inoculación natural



Fuente: Elaboración propia

Diagrama de caja 5. DQO inoculación artificial



Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de caja 4, que corresponde a la inoculación natural, la mediana del alimento es de 6210,45 mg/L y en el diagrama de caja 5, que corresponde a la inoculación artificial, se tiene un valor de 6185,66 para la mediana, y para el efluente se tiene 3224,94 y 4777,21, lo que nos permite determinar que el comportamiento de la DQO con inoculación natural, es más variable y por ende la inoculación

artificial es más eficiente. Para hallar el porcentaje de remoción, fue necesario utilizar la ecuación 2 que se mencionó anteriormente, donde es necesario usar los datos de DQO del alimento y del efluente. A continuación, se presenta la gráfica 13, correspondiente al porcentaje de remoción de materia orgánica.

Gráfica 13. Porcentaje de remoción



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica 13, el porcentaje de materia orgánica removido con inoculación natural es inestable y varía mucho, mientras que cuando se hace la inoculación artificial con el lodo granular, se puede observar una estabilización en el porcentaje de remoción, y se puede concluir que gracias al lodo granular, se obtiene un porcentaje de remoción mucho más alto. De acuerdo con estudios similares como el de Fabian Otalora⁶³, donde se trabajó en dos fases con el reactor ASTBR y RME, las cuales presentaron un aumento en el porcentaje de remoción, al tener mayor carga orgánica, y el de Jineth Arango⁶⁴, para el reactor ASTBR, se obtuvo un porcentaje de remoción máximo de 59,01% y para el RME 55,83%, por lo que se pudo determinar, que el proceso realizado en una sola fase, en el biorreactor híbrido anaerobio es más eficiente, ya que se llega a un valor máximo de 58,5%.

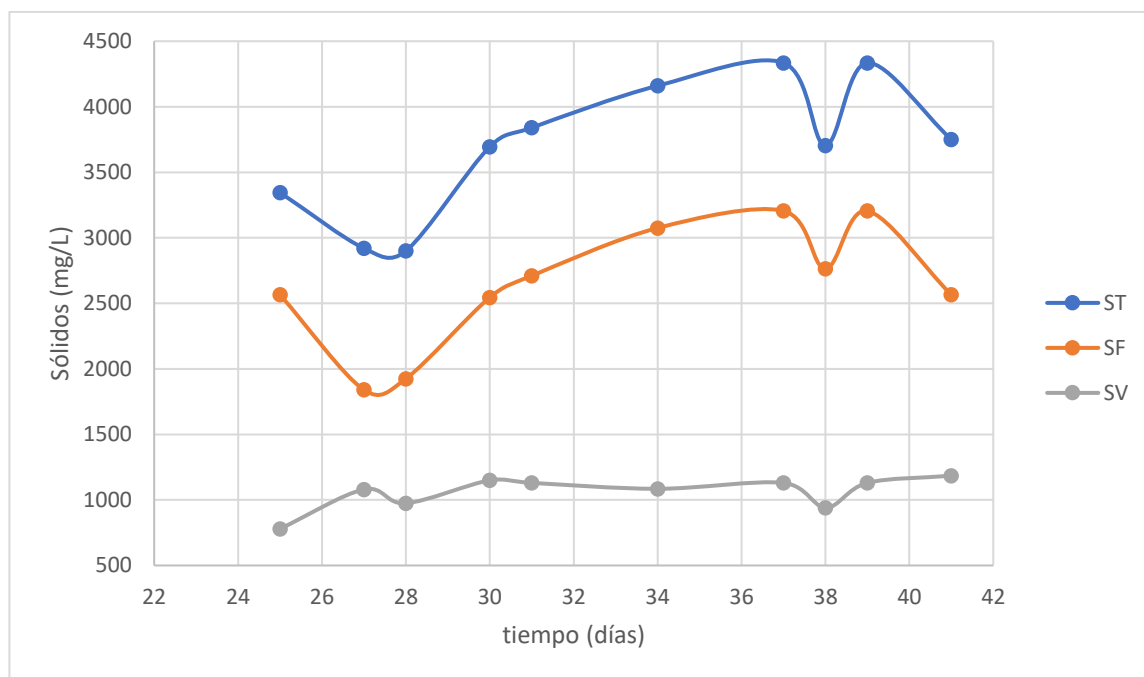
⁶³Otalora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg.60.

⁶⁴Arango Oviedo, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018. Pg. 62.

4.2.5 Sólidos totales, fijos y volátiles. La medición de sólidos, permite la estimación de materia orgánica existente en el fluido o fracción sólida del fluido en estudio, se realizó la medición durante 2 semanas (tres veces por semana) de sólidos totales, fijos y volátiles, los cuales se encuentran presentes en el efluente y en el lecho estructurado, para la determinación de sólidos se utilizan ciertos métodos de los cuales se habla con detalle en el **anexo E**, cabe añadir que los sólidos volátiles hacen referencia a la materia orgánica presente y los sólido fijos se relacionan directamente con la materia inorgánica.

4.2.5.1 Sólidos totales, fijos y volátiles del efluente. Esta medición se realizó, después de haber observado que en el efluente había presencia de sólidos, como se puede observar en la gráfica 14, el comportamiento de sólidos totales y fijos, es igual y tienden a decrecer, los sólidos totales existentes en una muestra, son importantes para determinar la influencia de estos, en la eficiencia de la producción de biogás. Los sólidos volátiles corresponden a la cantidad de materia orgánica que hay en el fluido.

Gráfica 14. Sólidos totales, fijos y volátiles del efluente



Fuente: Autor

En la tabla 8, se presentan los datos medidos en peso de cada una de las cápsulas, donde el peso 1 corresponde al peso de la cápsula sola, el peso 2 corresponde al peso de la cápsula más muestra menos agua y por último el peso 3 corresponde al peso de la cápsula más los orgánicos presentes.

Tabla 8. Datos obtenidos en peso

Capsula	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)
1	20,0266	20,1133	20,0907
5	31,9987	32,0728	32,054
6	31,8866	31,9535	31,9329
7	32,4433	32,512	32,4919
8	30,2604	30,3436	30,3219
A	31,584	31,6608	31,6382

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se pueden observar los resultados obtenidos de los sólidos totales, fijos y volátiles del efluente, graficados anteriormente en la gráfica 10 donde se muestra el comportamiento de los sólidos en diferentes días.

Tabla 9. Datos obtenidos sólidos

Dia	ST	SF	SV	SV/ST
34	0,1729	0,1278	0,0450	0,2606
37	0,1478	0,1103	0,0375	0,2537
38	0,1334	0,0923	0,0411	0,3079
39	0,1370	0,0969	0,0401	0,2925
41	0,1660	0,1227	0,0432	0,2608
44	0,1532	0,1081	0,0450	0,2942

Fuente: Elaboración propia

Para hallar los datos presentados en la tabla anterior fue necesario utilizar las ecuaciones 3,4,5 y 6 para sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles y la relación de sólidos volátiles con sólidos totales respectivamente.

Ecuación 3. Sólidos totales

$$ST = P_2 - P_1 * 1 * 10^{\frac{6}{20}}$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 4. Sólidos fijos

$$SF = P_3 - P_1 * 1 * 10^{\frac{6}{20}}$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 5. Sólidos volátiles

$$SV = ST - SF$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 6. Cociente de sólidos volátiles y sólidos totales

$$\frac{SV}{ST}$$

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a Juan Pesántez ⁶⁵ la determinación de sólidos totales es importante para el funcionamiento de las unidades de digestión de lodos, en este caso el biorreactor híbrido con inoculación artificial de lodo granular

4.2.5.2 Sólidos totales, fijos y volátiles del lecho estructurado. En la tabla 10 que se presenta a continuación se tienen los datos obtenidos en peso para para posteriormente hallar los sólidos totales, fijos y volátiles del lecho estructurado. Donde el peso 1 corresponde al peso de la cápsula vacía, el peso 2 corresponde al peso de la cápsula más la espuma más el agua, el peso 3 corresponde al peso de la cápsula más la espuma y por último el peso 4 el cual corresponde al peso de la cápsula más los inorgánicos existentes.

Tabla 10. Datos obtenidos en peso para el lecho estructurado

# Capsula	Peso 1 (g)	Peso 3 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)
6	32,3316	33,9913	32,4822	32,3503
10	29,8365	31,4936	29,9762	29,8544
16	31,8866	33,2778	31,9973	31,9004

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 y 11, se presentan los datos obtenidos de sólidos totales, fijos y volátiles del lecho estructurado, con el fin de determinar la cantidad de biomasa adherida en el soporte y la biomasa adherida por cada litro del reactor.

Tabla 11. Datos obtenidos del lecho estructurado

Agua	Sólidos fijos	Sólidos volátiles	SV/ST	Espuma + biomasa seca	Biomasa seca/3cm
1,5091	0,0187	0,1319	0,8758	0,1506	0,0336
1,5174	0,0179	0,1218	0,8718	0,1397	0,0226
1,2805	0,0138	0,0969	0,8753	0,1107	0,1023

Fuente: Elaboración propia

Para hallar los datos obtenidos en la tabla 10 fueron necesarias las ecuaciones 7, 8, 9, y 10 las cuales corresponden al peso de agua, sólidos fijos, sólidos volátiles y espuma seca.

⁶⁵ Pesántez V, Juan. Ambiental EDEI. Estudio Del Proceso De Depuración De Aguas Residuales Industriales Provenientes De Empresas Mineras. 2014.

Ecuación 7. Peso del agua

$$\text{Agua} = P_3 - P_2$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 8. Sólidos fijos lecho estructurado

$$\text{SF} = P_4 - P_1$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 9. Sólidos volátiles lecho estructurado

$$\text{SV} = P_4 - P_3$$

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 10. Peso espuma seca más biomasa

$$\text{Espuma seca} = P_3 - P_1$$

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla 12 donde están los valores de promedio, mediana y desviación necesarios para hallar los valores de biomasa seca por cada 3 cm de espuma para los datos 1,2, y 3 respectivamente con la ecuación 11.

Tabla 12. Promedio, mediana y desviación estándar

Promedio	0,116942857
Mediana	0,1171
Desviación	0,008301979

Fuente: Elaboración propia

Ecuación 11. Biomasa seca por cada 3 cm de espuma

$$\text{Dato 1} \frac{\text{Biomasa seca}}{3\text{cm}} = (\text{peso espuma seca} - \text{promedio})$$

$$\text{Dato 2} \frac{\text{Biomasa seca}}{3\text{cm}} = (\text{peso espuma seca} - \text{mediana})$$

$$\text{Dato 3} \frac{\text{Biomasa seca}}{3\text{cm}} = (\text{peso espuma seca} - \text{desviación})$$

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se halló el promedio de la biomasa seca por cada 3 cm de espuma y se obtuvo en valor de 0,0528 el cual se utiliza para hallar el valor de biomasa seca por cada cm de espuma para esto se utilizó la ecuación 12.

Ecuación 12. Biomasa seca por cada cm de espuma

$$\text{biomasa seca por cada cm} = \frac{\text{promedio de biomasa seca}}{3} = \frac{0,0528}{3} = 0,0176 \text{ g}$$

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se tienen los datos de biomasa en el lecho estructurado, para hallar estos datos se utilizó la ecuación 12 la cual se pudo observar anteriormente y las ecuaciones 13 y 14 las cuales se muestran a continuación correspondientes a la biomasa presente en el soporte y la biomasa adherida por cada L del reactor respectivamente.

Ecuación 13. Biomasa en el soporte

$$BS = \text{biomasa seca por cm} * L * N = \frac{0,0176\text{g}}{1 \text{ cm}} * 22 \text{ cm} * 13 \text{ espumas} = 5,0417 \text{ g}$$

Fuente: Elaboración propia

Donde L es la longitud de cada espuma y N el número de espumas que hay en el soporte.

Ecuación 14. Biomasa adherida por cada litro del reactor

$$BA = \frac{BS}{V_R} = \frac{5,0417\text{g}}{4,443 \text{ L}} * \frac{1000\text{mg}}{\text{g}} = 1134,75 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Datos de biomasa obtenida en el lecho estructurado

Biomasa seca/cm	Biomasa en el soporte	Biomasa adherida por L de Reactor	Promedio	Mediana	Desviación
0,01762	5,04170 g biomasa	1139,369161 mg biomasa/L	0,8743	0,8753	0,002159

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la autora María Varnero⁶⁶ los sólidos volátiles corresponden a la porción de sólidos totales que logra volatilizarse a una temperatura mayor a 550°C, estos contienen los componentes orgánicos que después serán convertidos en metano. Los sólidos totales son imprescindibles para que el proceso se dé de una manera eficiente, lo mencionado anteriormente está relacionada con la movilidad de las bacterias metanogénicas presentes en el sustrato la cual se ve afectada a medida que aumenta la cantidad de sólidos y afecta proporcionalmente la eficiencia y la producción del biogás y del metano.

⁶⁶ Varnero Morano, María Teresa. Manuel de Biogás. Chile: FAO, 2011. Pg. 36

5. CONCLUSIONES

- En el ensayo de trazadores se logró determinar el comportamiento del fluido dentro del biorreactor y por ende el comportamiento del biorreactor anaerobio híbrido, el cual presentó una combinación entre flujo de mezcla completa en la mayor parte y flujo pistón.
- Al realizar la inoculación natural durante 18 días, solo alimentando el reactor con el agua residual sintética, no se obtuvieron los resultados óptimos, ya que no presentó un buen comportamiento a nivel de remoción de materia orgánica, por lo que se tuvo que hacer la inoculación artificial adicionando 148,1 mL de lodo granular, y se pudo evidenciar un aumento en el porcentaje de remoción, como también buenos resultados para la caracterización de la biomasa.
- Se realizó el ensayo de adsorción del lecho estructurado y de adsorción del lodo granular, ninguno de estos tuvo influencia en el trazador, por lo que no afecta el comportamiento hidrodinámico del reactor.
- Después de analizar los resultados obtenidos por el programa TELAK, se pudieron hallar los valores del tiempo de retención hidráulico experimental, y el tiempo de retención hidráulico teórico, donde el experimental fue mayor al teórico, esto se debe a algún factor interno en el biorreactor, diferente al lecho estructurado.

6. RECOMENDACIONES

- Para complementar la influencia del lecho estructurado y del lodo granular en el ensayo de trazadores se puede realizar un diseño de experimentos con diferentes trazadores y diferentes concentraciones del trazador.
- Evaluar la posibilidad de utilizar otro tipo de inóculos con el fin de presentar las características más favorables para la actividad metanogénica la cual es importante para la producción de biogás.
- Realizar la adición de algún material adsorbente que logre mejorar los parámetros necesarios para la caracterización de la biomasa.
- Desarrollar un diseño de experimentos con el material adsorbente seleccionado para determinar la cantidad de AGV que puede adsorber
- Determinar el comportamiento hidrodinámico de un biorreactor híbrido por medio del método de ensayo de trazadores con la presencia del lodo granular dentro de este
- Evaluar la producción de biogás en un biorreactor híbrido anaerobio con la presencia de un material adsorbente
- Para tener mayor confiabilidad en los datos de pH realizar réplicas de cada una de las mediciones que se realicen a lo largo de la operación del biorreactor

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Pabuena M, Pasqualino J. Potencial de uso de biogás en Colombia. Tek Rev científica. 2014;14(2):27. doi:10.25044/25392190.468

Albanez R, Lovato G, Zaiat M, Ratusznei SM, Rodrigues JAD. Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimative of an AnSBBR applied to biohydrogen production by co-digestion of vinasse and molasses. Int J Hydrogen Energy. 2016;41(45):20473-20484. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.08.145

APHA, AWWA, WEF. 3120 B. Inductively Coupled Plasma (ICP) Method. Stand Methods Exam Water Wastewater, Am Public Heal Assoc. Published online 2017:1-5.

Arango O, Jineth. Evaluación de la producción de metano en un reactor escalonado con carbón activado en polvo y en un reactor de lecho fijo estructurado utilizando el hidrolizado de bagazo de caña como sustrato. Tesis para optar por el título de Ingeniera Ambiental. Universidad Antonio Nariño. Bogotá D.C. 2018

Arantes MK, Alves HJ, Sequinel R, da Silva EA. Treatment of brewery wastewater and its use for biological production of methane and hydrogen. Int J Hydrogen Energy. 2017;42(42):26243-26256. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.08.206

Arellano C, Houbrom E. Obtención de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos sometidos a hidrólisis enzimática. Published online 2015:21. (tesis de maestría).Universidad Veracruzana,Veracruz, Mexico.

Ariza Calvo D, Rincón Ravelo M, Paz Cadavid CA, Gutiérrez-Montero DJ. Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. Rev Colomb Biotecnol. 2019;21(2):118-130. doi:10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555

Arora S, Rani R, Ghosh S. Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects. J Biotechnol. 2018;269(February):16-34. doi:10.1016/j.jbiotec.2018.01.010

Baêta BEL. Aproveitamento energético a partir da digestão anaeróbia de hidrolizado hemicelulósico gerado pelo pré-tratamento por auto-hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar considerando o contexto da biorrefinaria. Published online 2016:0-60.

Baêta BEL, Luna HJ, Sanson AL, Silva SQ, Aquino SF. Degradation of a model azo dye in submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) operated with powdered activated carbon (PAC). J Environ Manage. 2013;128:462-470. doi:10.1016/j.jenvman.2013.05.038

Balat M, Ayar G. Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. *Energy Sources*. 2005;27(10):931-940. doi:10.1080/00908310490449045

Barreto RA. Fossil fuels, alternative energy and economic growth. *Econ Model*. 2018;75(July):196-220. doi:10.1016/j.econmod.2018.06.019

Becerra Quiroz AP. Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia - Colombia a partir del Análisis de Ciclo Vida. *Ing Solidar*. 2016;12(20):133-149. doi:10.16925/in.v12i20.1548

Briseño L. Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semi-sólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía. Published online 2017:99.

Castillo Saldarriaga CR. Obtención de un hidrolizado detoxificado a partir de biomasa lignocelulósica de *Panicum maximum* para su uso como sustrato en la fermentación alcohólica. Published online 2014:158. <http://www.bdigital.unal.edu.co/46027/>

Conil P. EL BIOGÁS Gas Natural Renovable para el desarrollo rural Potencial para Colombia. Published online 1984.

Consejo nacional de política económica y social república de Colombia. Documento CONPES. Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. 2016. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3819.pdf>. Pg. 9.

Cortes W. Materiales Lignocelulosicos Como Fuente De Biocombustibles Y Productos Químicos. *Cienc y Tecnol Aeronáutica*. 2011;16:43-44.

Fuess LT, Kiyuna LSM, Ferraz ADN, et al. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. *Appl Energy*. 2017;189:480-491. doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.071

Ge X, Chang C, Zhang L, et al. Conversion of Lignocellulosic Biomass Into Platform Chemicals for Biobased Polyurethane Application. Vol 3. 1st ed. Elsevier Inc.; 2018. doi:10.1016/bs.aibe.2018.03.002

González ET, Paula Catalina J, Gómez Echeverri LF. Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Una revisión sistemática. *Ingeciencia*. 2017;2(1):44-64.

Guo K, Guan Q, Xu J, Tan W. Mechanism of Preparation of Platform Compounds from Lignocellulosic Biomass Liquefaction Catalyzed by Bronsted Acid: A Review. *J Bioresour Bioprod.* 2019;4(4):202-213. doi:10.12162/jbb.v4i4.009

Harris Correa RJ. Selección De Pretratamientos En Base a Caracterización Físico-Química De Residuos De Eucalyptus Globulus Y Populus Canadensis Para La Producción De Bioetanol. *Univ Chile.* Published online 2012:84.

Harun R, Davidson M, Doyle M, Gopiraj R, Danquah M, Forde G. Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility. *Biomass and Bioenergy.* 2011;35(1):741-747. doi:10.1016/j.biombioe.2010.10.007

Hendriks ATWM, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol.* 2009;100(1):10-18. doi:10.1016/j.biortech.2008.05.027

Jędrzejczyk M, Soszka E, Czapnik M, Ruppert AM, Grams J. Physical and Chemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass.; 2019. doi:10.1016/B978-0-12-815162-4.00006-9

Kiang Y-H. Other and Emerging Alternative Energy Technology.; 2018. doi:10.1016/b978-0-12-813473-3.00010-6

Krishna D, Kalamdhad AS. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production - A review. *J Environ Chem Eng.* 2014;2(3):1821-1830. doi:10.1016/j.jece.2014.07.024

Kumar A, Samadder SR. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Energy.* 2020;197. doi:10.1016/j.energy.2020.117253

Lorenzo Acosta Yaniris OAMC. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>. Icidca. Published online 2005.

Lovato G, Albanez R, Stracieri L, Zaiat M, Ratusznei SM, Rodrigues JAD. Design study of an AnSBBR for hydrogen production by co-digestion of whey with glycerin: Interaction effects of organic load, cycle time and feed strategy. *Int J Hydrogen Energy.* 2017;42(15):9567-9576. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.03.125

Marroquin J. Desarrollo de biorreactores controlados aplicables al estudio de cultivos de microorganismos de interes comercial. Published online 2018:1-78. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

McMillan JD. Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. Published online 1994:292-324. doi:10.1021/bk-1994-0566.ch015

Mielcarek A, Rodziewicz J, Janczukowicz W, Dulski T, Ciesielski S, Thornton A. Denitrification aided by waste beer in anaerobic sequencing batch biofilm reactor (AnSBBR). *Ecol Eng.* 2016;95:384-389. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.06.083

Miralles-Quirós JL, Miralles-Quirós MM. Are alternative energies a real alternative for investors? *Energy Econ.* 2019;78:535-545. doi:10.1016/j.eneco.2018.12.008

Morales De La Rosa S. Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos memoria Para aspirar al grado de. Published online 2015:15. http://digital.csic.es/bitstream/10261/132717/1/morales_de_la_rosa_silvia.pdf

Navarro E, Abril A. Etanol a partir de biomasa lignocelulósica. *Res Gate.* 2012;(October):101. doi:10.1002/glia.22867

Navarro N. Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. Published online 2017:72.

Obtido H, Do PA, Estágio UM, Presença NA, Ativado DEC, Pó EM. 1 universidade federal de ouro preto p. Published online 2018.

Opia AC, Hamid MKBA, Syahrullail S, Rahim ABA, Johnson CAN. Biomass as a potential source of sustainable fuel, chemical and tribological materials – Overview. *Mater Today Proc.* 2020;(xxxx). doi:10.1016/j.matpr.2020.04.045

Otalora T, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Antonio Nariño. 2018.

Passos F, Cordeiro PHM, Baeta BEL, de Aquino SF, Perez-Elvira SI. Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. *Bioresour Technol.* 2018;253:49-54. doi:10.1016/j.biortech.2017.12.071

Pérez J, Rincón N, Bracho N. Evaluación de la adsorción de rodamina WT, litio y cloruro en reactores por carga inoculados con lodo anaerobio. *Rev Fac Ing.* 2011;(58):74-84.

Pérez S, Daniela V. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como

material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR). Published online 2020:1-114. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Pesántes V, Juan. Ambiental EDEI. "Estudio Del Proceso De Depuración De Aguas Residuales Industriales Provenientes De Empresas Mineras.". Published online 2014:113.

Pinto C. L, Quipuzco U. L. Aprovechamiento De Aguas Residuales Domésticas Para Producción De Biogás Y Biol Mediante Digestores De Carga Diaria. An Científicos. 2015;76(1):87. doi:10.21704/ac.v76i1.768

Posten C. 9. Continuously operating bioprocesses – production under steady state conditions. Integr Bioprocess Eng. Published online 2018:220-249. doi:10.1515/9783110315394-009

Qian EW. Pretreatment and Saccharification of Lignocellulosic Biomass. Elsevier; 2013. doi:10.1016/B978-0-12-404609-2.00007-6

Ramos L. Produccion de biogas a partir de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. procedente de diferentes procesos. Dissertation. Published online 2014:282.

Reyes Aguilera EA. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. Rev Científica FAREM-Estelí. 2018;(24):60-81. doi:10.5377/farem.v0i24.5552

Ribeiro FR, Passos F, Gurgel LVA, Baêta BEL, de Aquino SF. Anaerobic digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor. Sci Total Environ. 2017;584-585:1108-1113. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.170

Rinaldi R, Schüth F. Acid hydrolysis of cellulose as the entry point into biorefinery schemes. ChemSusChem. 2009;2(12):1096-1107. doi:10.1002/cssc.200900188

Rincón JM, Martínez DM, Lozano DH, et al. Disponibilidad de Biomasa Residual y su Potencial para la Producción de Biogás en Colombia. Rev CIDET. 2018;(Noviembre 2018):16-25.

Rodríguez E, Villegas E. Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico. Métodos y Mater. 1969;2(1):25-32. doi:10.15517/mym.v2i1.13470

Sánchez Molina J, Cardona Gallo S. Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de pequeña escala. Av en Recur Hidráulicos. 2009;(20):65-79.

Seddiki M, Bennadji A. Multi-criteria evaluation of renewable energy alternatives for electricity generation in a residential building. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019;110(January):101-117. doi:10.1016/j.rser.2019.04.046

Show KY. Chapter 2 Factors affecting anaerobic granulation. *Waste Manag Ser.* 2006;6(C):35-56. doi:10.1016/S0713-2743(06)80104-2

Stöcker M. Biofuels and biomass-to-liquid fuels in the biorefinery: Catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. *Angew Chemie - Int Ed.* 2008;47(48):9200-9211. doi:10.1002/anie.200801476

Sudmalis D, Gagliano MC, Pei R, et al. Fast anaerobic sludge granulation at elevated salinity. *Water Res.* 2018;128:293-303. doi:10.1016/j.watres.2017.10.038

Sun Y, Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review. *Bioresour Technol.* 2002;83(1):1-11. doi:10.1016/S0960-8524(01)00212-7

Tatiana K, Orozco M, Sofía A, et al. Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca Biogas potential of agro-industrial residues generated in the department of Cundinamarca Potencial do biogás dos residuos agro-industriais gerados no departa. *Rev ION.* 2016;29(2):23-37. doi:10.18273/revion.v29n2-2016002

Uçkun Kiran E, Stamatelatos K, Antonopoulou G, Lyberatos G. Production of Biogas via Anaerobic Digestion. Elsevier Ltd; 2016. doi:10.1016/B978-0-08-100455-5.00010-2

Varnero M, María. FAO, MINENERGIA, PNUD, GEF. Manual del Biogás. *Proy CHI/00/G32.* Published online 2011:120. doi:10.1073/pnas.0703993104

Venkata Mohan S, Mohanakrishna G, Sarma PN. Integration of acidogenic and methanogenic processes for simultaneous production of biohydrogen and methane from wastewater treatment. *Int J Hydrogen Energy.* 2008;33(9):2156-2166. doi:10.1016/j.ijhydene.2008.01.055

Volpini V, Lovato G, Albanez R, Ratusznei SM, Rodrigues JAD. Biomethane generation in an AnSBBR treating effluent from the biohydrogen production from vinasse: Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimation. *Renew Energy.* 2018;116:288-298. doi:10.1016/j.renene.2017.09.004

Wei W, Guo W, Ngo HH, et al. Enhanced high-quality biomethane production from anaerobic digestion of primary sludge by corn stover biochar. *Bioresour Technol.* 2020;306:123159. doi:10.1016/j.biortech.2020.123159

Whitten, K., Davis, R., Peck M. y Stanley G. *Qu mi ca.* Published online 2015.

Wyman CE. Technical Progress, Opportunities, and Commercial Challenges. *Development*. 1999;24:189-226.

Xu H, Li Y, Hua D, et al. Enhancing the anaerobic digestion of corn stover by chemical pretreatment with the black liquor from the paper industry. *Bioresour Technol*. 2020;306(February):123090. doi:10.1016/j.biortech.2020.123090

Zaiat M. Desenvolvimento e análise de biorreatores anaeróbios contendo células imobilizadas para tratamento de águas residuárias. Univ São Paulo. Published online 2003.

ZEA J, BERNAL J, CARVAJAL D. Biodigestores De Escala a 50 Litros, Una Solución Para La Producción De Gas, Abono Y Aprovechamiento De Los Residuos Sólidos Orgánicos. *PhD Propos*. 2015;1:1-25. doi:10.1017/CBO9781107415324.004

Zheng Y, Zhao J, Xu F, Li Y. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog Energy Combust Sci*. 2014;42(1):35-53. doi:10.1016/j.pecs.2014.01.001

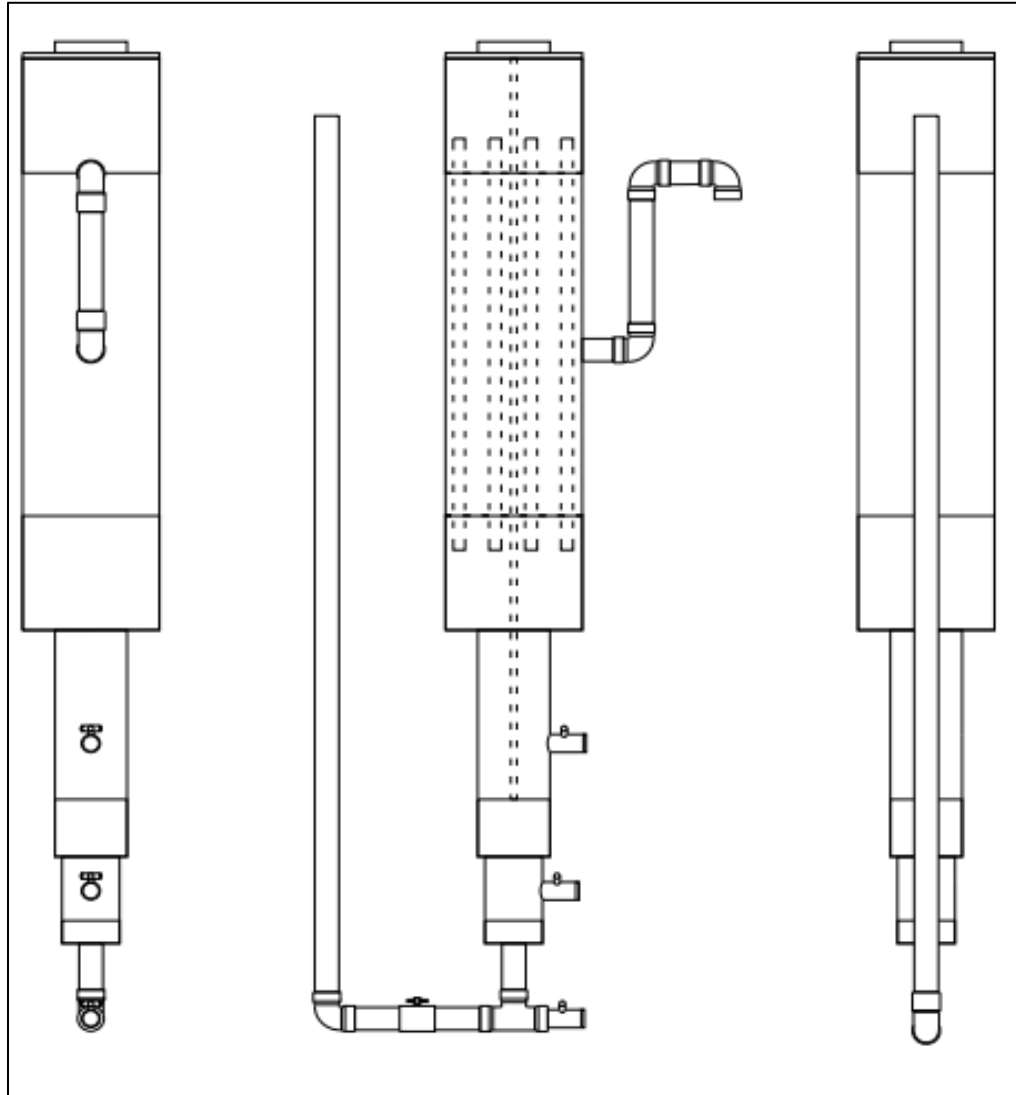
ANEXOS

ANEXO A.

ILUSTRACIONES Y PLANOS DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO

A continuación, se presentan las ilustraciones donde se pueden observar los planos 2D del biorreactor híbrido anaerobio y biorreactor híbrido anaerobio con el lecho estructurado, teniendo en cuenta las medidas respectivas.

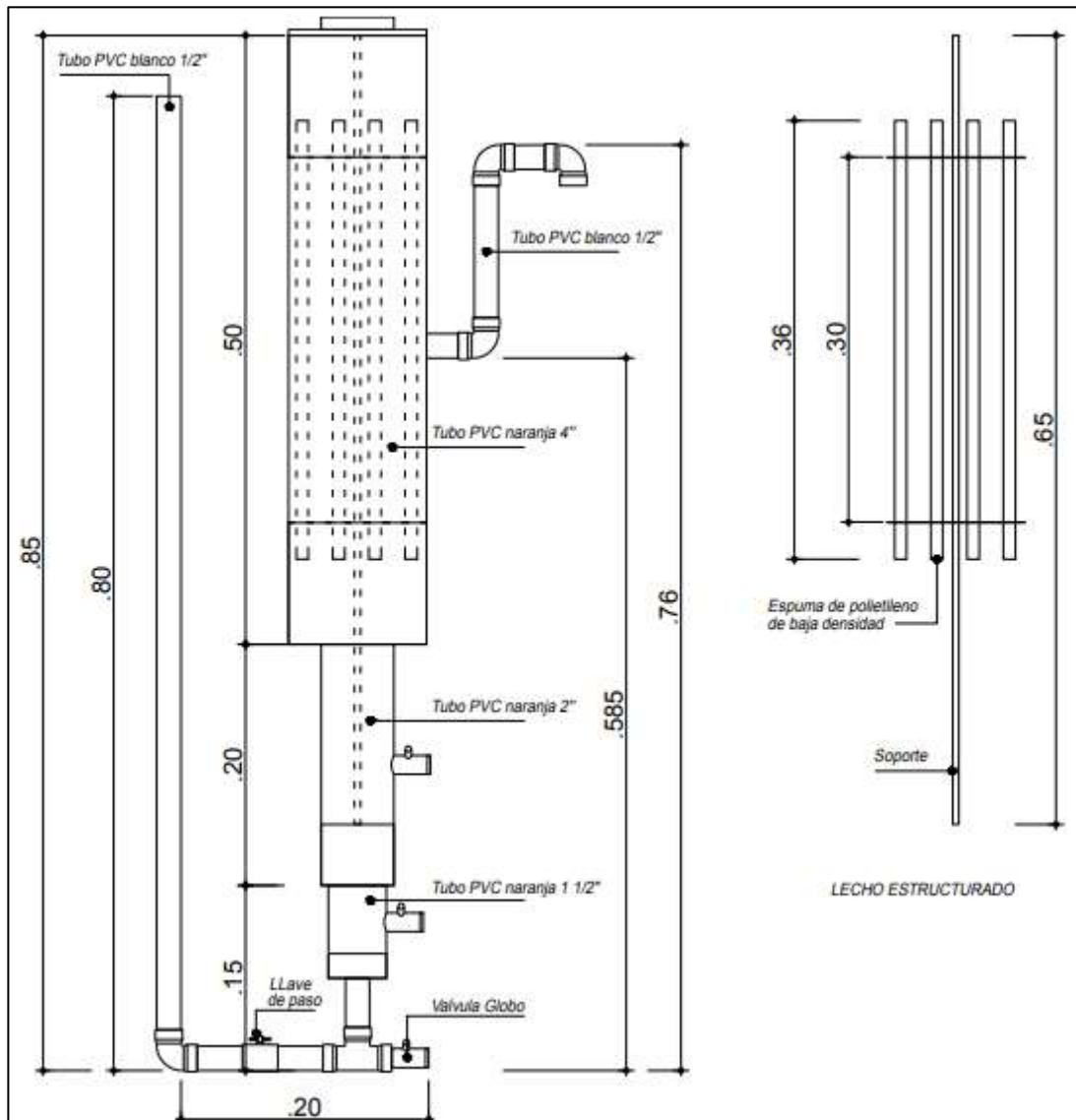
Plano 1 biorreactor híbrido anaerobio



	<i>Fundación Universidad de América</i> <i>Departamento de Ingeniería Química</i>	<i>Elaboró:</i> <i>Luisa Fernanda Morales Bultrago</i>	<i>Fecha:</i> <i>01 julio de 2020</i>	<i>salvo indicación todos los valores están dados en milímetros.</i>
	<i>Título:</i> <i>Evaluación del comportamiento hidrodinámico y de la operación del bio reactor anaeróbico híbrido.</i>	<i>Plano:</i> <i>Biorreactor híbrido anaeróbico.</i>	<i>Escala:</i> <i>sin escala</i>	

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD 2019

Plano 2 - Medidas del biorreactor híbrido anaerobio y lecho estructurado.

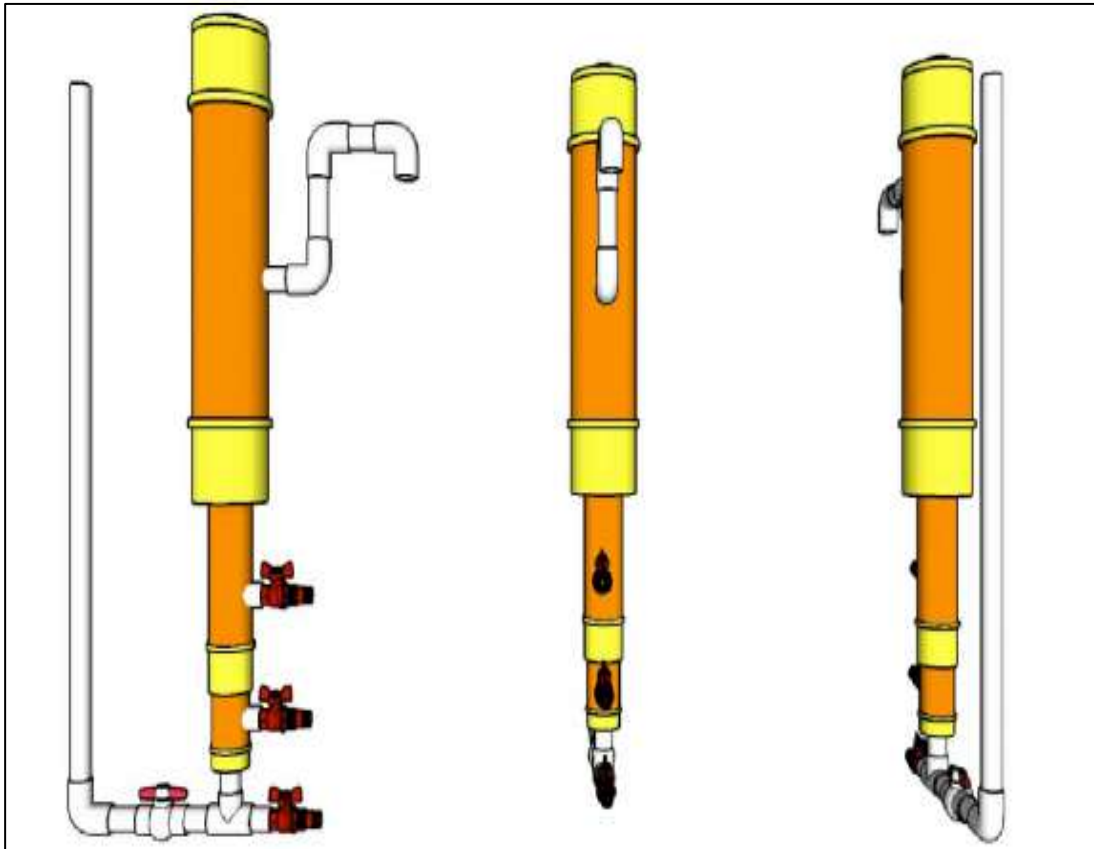


	Fundación Universidad de América Departamento de Ingeniería Química	Elaboró: Luisa Fernanda Morales Buitrago	Fecha: 01 julio de 2020	salvo indicación todos los valores están dados en milímetros.
	Título: Evaluación del comportamiento hidrodinámico y de la operación del bio reactor anaeróbico híbrido.	Plano: Biorreactor híbrido anaeróbico.	Escala: sin escala	

Fuente: Elaboración propia en AutoCAD 2019

En las ilustraciones que se puede observar a continuación, se presentan los planos en 3D del prototipo del biorreactor híbrido anaerobio, donde se combina el diámetro variable y el lecho estructurado, resaltando que este prototipo se construyó siguiendo las medidas estipuladas por la Universidad Antonio Nariño en anteriores proyectos.

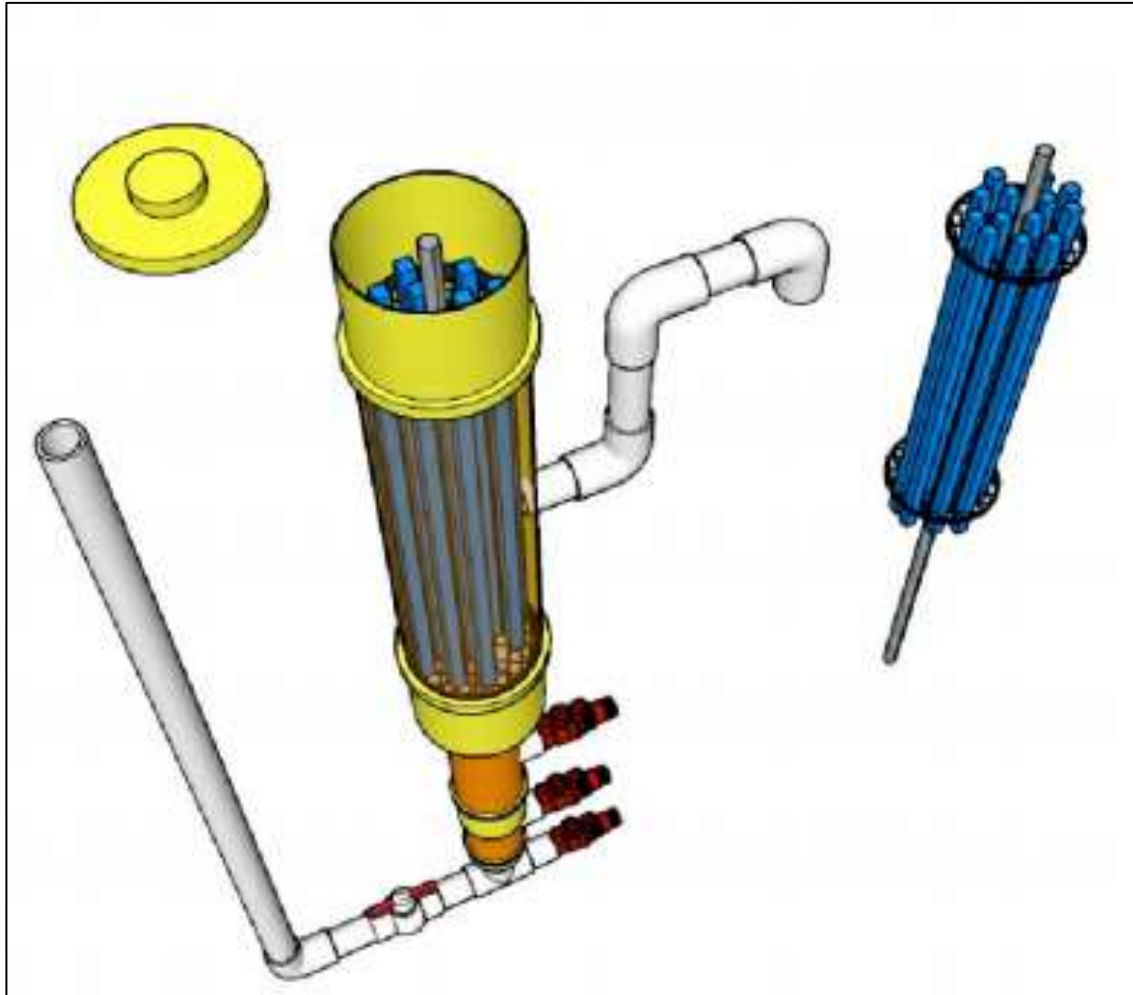
Prototipo reactor híbrido anaerobio 3D



	<i>Fundación Universidad de América</i> <i>Departamento de Ingeniería Química</i>	<i>Elaboró:</i> <i>Luisa Fernanda Morales Buitrago</i>	<i>Fecha:</i> <i>01 julio de 2020</i>	<i>salvo indicación</i> <i>todos los valores están</i> <i>dados en metros.</i>
	<i>Título:</i> <i>Evaluación del comportamiento hidrodinámico y de la</i> <i>operación del bio reactor anaeróbico híbrido.</i>	<i>Plano:</i> <i>Biorreactor híbrido anaeróbico.</i>	<i>Escala:</i> <i>Sin escala</i>	

Fuente: Elaboración propia en SketchUp Pro-2019

Prototipo reactor híbrido anaerobio y lecho estructurado 3D.



	<p><i>Fundación Universidad de América</i> <i>Departamento de Ingeniería Química</i></p>	<p><i>Elaboró:</i> <i>Luisa Fernanda Morales Buitrago</i></p>	<p><i>Fecha:</i> <i>01 julio de 2020</i></p>	<p><i>salvo indicación todos los valores están dados en metros.</i></p>
	<p><i>Título:</i> <i>Evaluación del comportamiento hidrodinámico y de la operación del bio reactor anaeróbico híbrido.</i></p>	<p><i>Plano:</i> <i>Biorreactor híbrido anaeróbico.</i></p>	<p><i>Escala:</i> <i>Sin escala</i></p>	

Fuente: Elaboración propia en SketchUp Pro-2019

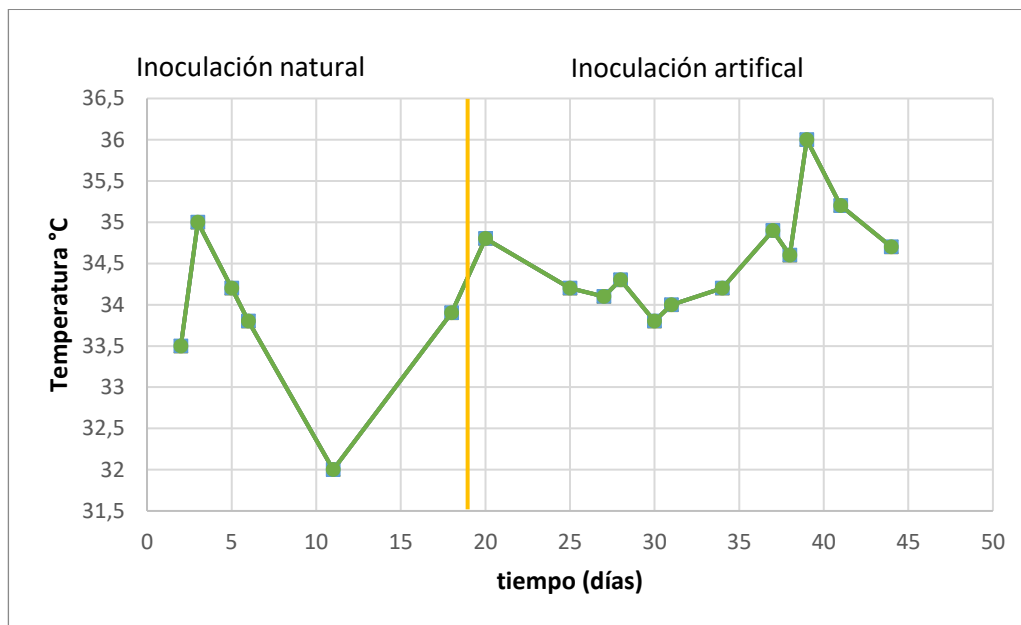
ANEXO B.

MONITOREO DE TEMPERATURA DEL BIORREACTOR ANAEROBIO HÍBRIDO

El circuito de calentamiento, se complementa con el cordón de calentamiento en la parte exterior del biorreactor, la cual va desde la parte inferior, hasta la parte superior de este, el circuito controlador de la termocupla y cargadores de 12 V como fuente de poder.

Teniendo en cuenta que la temperatura óptima del biorreactor híbrido anaerobio es 35°C, lo cual hace necesario mantener controlada y monitoreada la temperatura en el interior del reactor, con el fin de obtener una medición más precisa, se tiene sumergida la termocupla dentro del biorreactor por la parte superior, esta sonda tiene un largo de 15 cm aproximadamente, la cual estaba ubicada a determinada altura (0,70 m) del biorreactor, elemento que se encarga de medir en tiempo real y en todo momento, la temperatura del reactor, por lo que se obtuvo la siguiente gráfica, donde se puede observar el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo, es decir, en los días de operación.

Temperatura por día de operación



Fuente: Elaboración propia

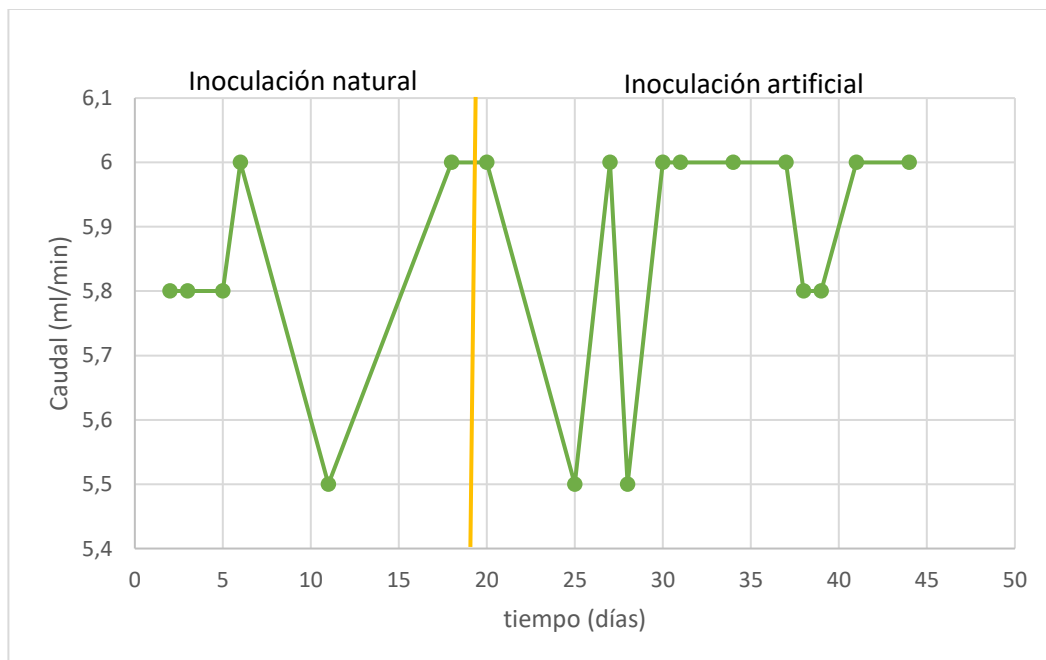
ANEXO C.

BOMBA PERISTÁLTICA

Se trata de un instrumento que se utiliza usualmente para volúmenes bajos, con un suministro de alimento constante y fijo, este diseño fue desarrollado mediante un prototipo con materiales de bajo costo, ya que existió la posibilidad de imprimir con tecnología 3D gran parte de las piezas que componen la bomba, este proyecto fue presentado y desarrollado por el grupo GRESIA de la UAN en el año 2017.

Para la operación del biorreactor anaerobio híbrido, es necesario el uso de la bomba peristáltica patentada por el laboratorio de la Universidad Antonio Nariño, con número de registro de patente CO2018008436, la cual se utilizó para controlar el flujo del caudal ingresado al reactor, este control del caudal permitió obtener la gráfica que se presenta a continuación.

Caudal



Fuente: Elaboración propia

ANEXO D.

CÁLCULOS DEL ENSAYO DEL TRAZADORES

Después de realizar el ensayo de trazadores, los datos fueron almacenados por el programa TELAK, estos datos se utilizan principalmente para determinar y analizar, el comportamiento del fluido dentro del biorreactor, para ello es necesario desarrollar cada uno de los cálculos planteados en el libro de Levenspiel *“Tracer Technology modeling the flow of fluids”*.

La curva de salida obtenida mediante el ensayo de trazadores, normalmente está compuesta por la concentración del trazador y el tiempo, sin embargo para el ensayo de trazadores realizado en el laboratorio, se desconocía la concentración del trazador (colorante) de color verde, por lo que la misma está compuesta por la señal percibida por el sensor de densidad óptica (eje y), y el tiempo durante el cual se realizó este ensayo (eje x); dicho esto, existen dos propiedades importantes y útiles, estas son la varianza (σ^2) y la media (\bar{t}), las cuales se obtienen después de tener la curva de pulso-respuesta y se usan para caracterizar esta, la varianza nos indica que tan amplia es la curva obtenida, y la media nos indica el tiempo promedio que tarda el trazador en abandonar el reactor, es decir, el tiempo de retención.

Para realizar el cálculo pertinente para la media (\bar{t}), es necesario hallar el área bajo la curva de la gráfica pulso-respuesta (señal vs tiempo) por medio de la siguiente ecuación.

Ecuación área bajo la curva

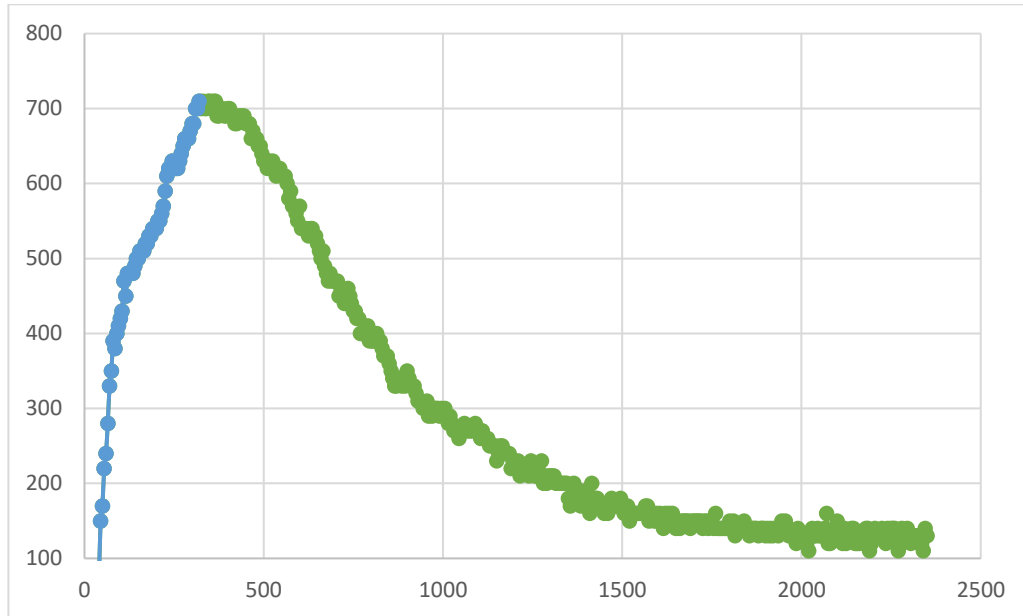
$$A = \int_0^{\infty} s \, dt$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Teniendo en cuenta los cálculos realizados por el autor Sergio Pérez ⁶⁷, para hallar la gráfica de la curva, se realizó el método numérico de Simpson 1/3 y Simpson 3/8, esto se realizó con el objetivo de obtener los polinomios correspondientes a cada sección de la gráfica que se muestra a continuación.

⁶⁷ Pérez Peña, Sergio Alejandro. Evaluación de la producción de biogás en un reactor metanogénico escalonado (RME) usando cenizas de cascarilla de arroz como material adsorbente para diferentes cargas orgánicas (OLR), Tesis de pregrado. Universidad de América. 2020. P. 90-91.

Gráfica Estimulo-respuesta polinomios Simpson



Fuente: Elaboración propia

Después de hallar el área bajo la curva, se procede a hallar la media de la curva, mediante la ecuación que se presenta a continuación correspondiente a la media (\bar{t}).

Ecuación Media de la curva (tiempo de retención)

$$\bar{t} = \frac{\sum ts dt}{\sum s dt}$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

El tiempo de retención experimental, hallado por medio de la ecuación anterior, fue de 834,9808549 minutos equivalentes a 13,9 horas, teniendo el tiempo de retención experimental, es posible hallar la varianza y la varianza normalizada, mediante las ecuaciones que se presentan a continuación respectivamente.

Ecuación de varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum(t_i - t_m)^2 s dt}{\sum s dt} - \bar{t}^2$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Ecuación varianza normalizada

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

El valor obtenido de la varianza y la varianza normalizada, fue de 381065,2364 min² y 0,546570635 respectivamente. Para hallar el número de tanques en serie, se utilizaron las ecuaciones de varianza y varianza normalizada las cuales se igualan.

Ecuación varianza

$$\sigma^2 = \frac{\bar{t}^2}{N} = \frac{834,98}{381065,23} = 1,829$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Ecuación varianza normalizada

$$\sigma^2 = 2 \frac{D}{uL} = \frac{834,98}{381065,23} = \frac{1}{N} = 1,829$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Para hallar el número de tanques en serie, existen dos maneras, la primera utilizando la varianza como se puede observar en la ecuación presentada anteriormente, y la varianza normalizada, la cual se utiliza en la ecuación correspondiente junto con otros parámetros, teniendo el valor de las otras variables, se logra determinar el número de tanques en serie (N), este se determina con el fin de representar la cantidad de reactores de mezcla completa, equivalente a los reactores no ideales del mismo tamaño, tanto en la ecuación varianza, como en la ecuación de varianza normalizada, se obtiene un valor de 1,829 lo cual se puede aproximar a 2 tanques en serie de mezcla completa.

Posteriormente para darle continuación al análisis del ensayo de trazadores, se realizó el cálculo de varios parámetros, como lo son la curva E, la curva F y el tiempo de retención teórico, los cuales se explican con detalle a continuación:

La curva E, es conocida también como espectro de densidad, es una función probabilística, la cual resulta de la inyección puntual de un trazador, en este caso colorante verde y la señal percibida por el sensor.

La curva F, se le conoce como función suma del tiempo medio de retención, que al igual que la curva mencionada anteriormente, es una función probabilística, y corresponde a la suma de la variable correspondiente y resulta de la integración de

la función de densidad respecto a la variable, es decir, cuando la adición del trazador se realiza de manera continua, a diferencia que la curva E que se hace en un solo punto.⁶⁸ Cabe añadir, que tanto la función suma del tiempo de retención, como el espectro de densidad, se pueden obtener mediante cálculos matemáticos, lo que quiere decir que una depende de la otra, para aclarar lo anterior, se evidencian las ecuaciones, las cuales hacen referencia a las curvas E y F respectivamente.

Ecuación curva E

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

En esta ecuación, se tiene el área total bajo la curva que es igual a 1 y $s(t)$, que hace referencia a cada dato de señal percibido por el sensor de densidad óptica y registrado en el programa TELAK, posteriormente con la ecuación de la curva E donde se normaliza la curva dividiendo cada valor de s en el área total bajo la curva, y los datos obtenidos son graficados en y , los datos de señal y el tiempo en x , en la gráfica que se presenta a continuación donde se puede observar lo mencionado anteriormente.

Ecuación curva E normalizada

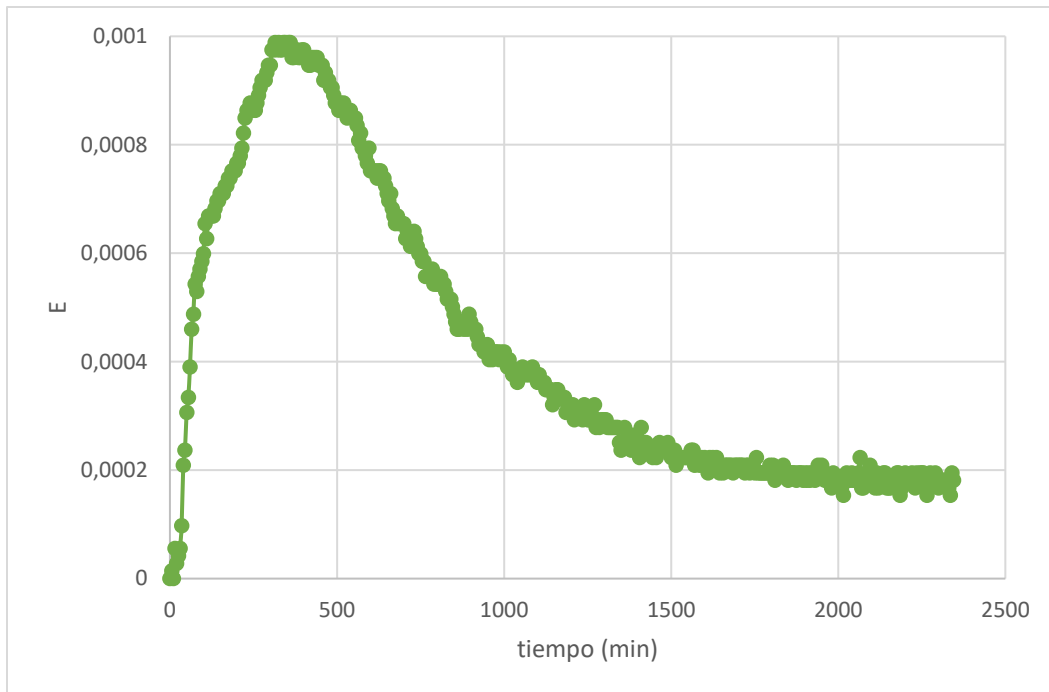
$$E(t) = \frac{s(t)}{A}$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Para la determinación de la curva F se presenta la ecuación correspondiente a la ecuación de la curva F, se tienen las ecuaciones previas, donde se normaliza cada dato obtenido de tiempo, en el tiempo medio de retención y posteriormente se normaliza el valor de E, mediante el producto de este y el tiempo medio de retención respectivamente.

⁶⁸ Sánchez, Cardona. Evaluación del comportamiento hidráulico de un reactor aerobio y un reactor anaerobio, en una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de pequeña escala. Revista: Avances en recursos Hidráulicos. No 20. 2009. p.71-73.

Gráfica E vs t



Fuente: Elaboración propia

Ecuación normalización de tiempos (Θ)

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}}$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Ecuación normalización E (E_{θ})

$$E_{\theta} = E(t)\bar{t}$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

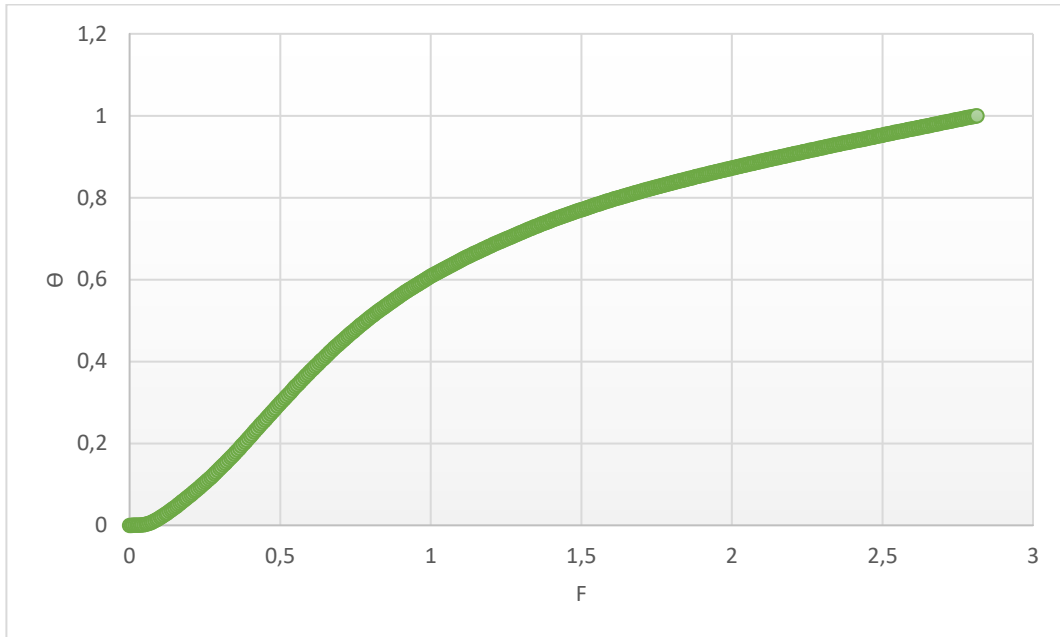
Ecuación Curva F

$$F = \int_0^{\infty} E_{\theta} d\theta$$

Fuente: Elaboración propia basada en Levenspiel octave. Tracer technology modeling the Flow of fluids

Para hallar la curva F la cual se muestra a continuación la gráfica correspondiente, donde se toman los datos de θ en el eje x y en el eje y el acumulado de F, esto con el fin de representar la señal del trazador de forma acumulada en la salida del reactor.

Gráfica curva F



Fuente: Elaboración propia

ANEXO E.

DETERMINACIÓN DE DQO, PORCENTAJE DE REMOCIÓN Y SÓLIDOS (TOTALES, FIJOS Y VOLÁTILES)

La demanda química de oxígeno, es una medida equivalente a materia orgánica, que puede oxidarse a determinados parámetros establecidos, como pueden ser la temperatura y el pH, generalmente se determina para efluentes industriales, efluentes domésticos y aguas contaminadas. Los parámetros seleccionados para determinar la demanda química de oxígeno en este proyecto, fueron de 35 °C y un pH neutro que oscila entre 6,5 y 7,5 tanto para el alimento, como para el efluente. Para llevar a cabo las mediciones de DQO, se tomó como base el procedimiento, presentado en el libro Standard Methods ⁶⁹, inicialmente se realizó la toma de muestras, tanto del alimento, como del efluente, tal y como se mencionó anteriormente de 10 mL cada una, en tubos falcón de 15 mL, se pesaron en la balanza analítica, con el fin de tener un peso aproximado entre ellas, lo que es necesario para poder introducir las en la centrifugadora, y que no vaya a existir un desnivel en este. Posteriormente se realizó una dilución de las muestras del alimento y del efluente, para disminuir la concentración de 4000 mg/L a 500 mg/L en un balón de 50 mL, como se puede observar en la siguiente ecuación, para determinar el volumen necesario, y para realizar la dilución, se utilizó la siguiente ecuación.

Ecuación de dilución

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Fuente: Elaboración propia con base en Whitten, Davis, Peck & Stanley. Química. 8va ed.

Donde C_1 es la concentración a la que se quiere llegar, V_1 es el volumen en el que va a ser diluida la muestra, C_2 la concentración de la muestra, y finalmente V_2 el volumen necesario, teniendo en cuenta los datos mencionados anteriormente, se obtuvo un volumen de 6,25 mL, los cuales se agregaron en los balones de 50 mL cada uno (alimento, válvula y efluente) y se aforaron con agua destilada, como se muestra en la ilustración correspondiente, posteriormente, se tomaron 2 mL de cada uno de los balones con las diluciones correspondientes y se agregaron a los viales, los cuales contienen 3 mL de reactivo, tal y como se puede observar en la ilustración respectiva, se agitaron lentamente y pasaron al termo reactor, observado en la ilustración correspondiente donde se tuvo el termo reactor a 150 ° C durante 2 horas, después de las 2 horas, se dejan enfriar a temperatura ambiente durante una hora, y finalmente se hizo la medición de absorbancia en el espectrofotómetro a 610 nm, como se muestra en la ilustración correspondiente.

⁶⁹ Tran, T Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23rd edition. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, 1545. 2017.

Ilustración dilución de muestras



Fuente: Elaboración propia

Ilustración de viales con reactivo



Fuente: Elaboración propia

Ilustración termo reactor



Fuente: Elaboración propia

Ilustración espectrofotómetro



Fuente: Elaboración propia

Teniendo los datos de absorbancia de DQO del alimento, del efluente y el factor de dilución, se obtiene la siguiente tabla, cabe aclarar que el factor de dilución se halló con la ecuación que se presenta a continuación.

Ecuación factor de dilución

$$F = \frac{V_f}{V_i}$$

Fuente: Elaboración propia con base en Whitten, Davis, Peck & Stanley. Química. (8va ed.)

El volumen inicial es de 6,25 mL necesarios para la dilución, y el volumen final es de 50 mL del balón aforado, con esto se obtuvo un factor de dilución de 8 mL, y el producto, entre el factor de dilución y el valor de la curva realizada por el autor Fabián Otálora⁷⁰, arrojaron el valor de DQO.

Tabla DQO

DQO alimento	Día de operación	DQO Efluente
4851,597333	3	2947,213333
3522,496	5	2877,782667
6210,454667	6	3224,936
6279,885333	11	6200,536
9900,198667	18	6478,258667
6746,062667	24	5049,970667
7083,297333	25	5040,052
6894,842667	27	4891,272
6345,745333	28	4107,697333
6894,842667	30	4891,272
6101,349333	31	4762,329333
6200,536	34	4792,085333
5307,856	37	3224,936
5674,846667	38	3621,682667
6170,78	39	2560,385333

Fuente: Elaboración propia

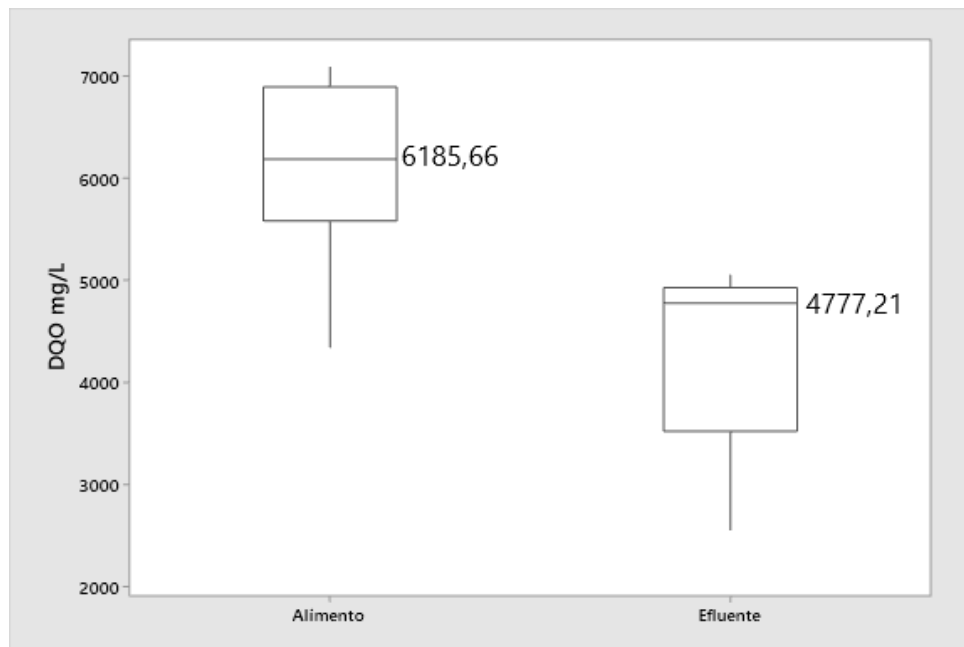
Los datos obtenidos en la tabla presentada anteriormente, nos permitieron realizar las gráficas correspondientes, respecto al comportamiento que tuvo la DQO del

⁷⁰ Otálora Tapiero, Fabián. Evaluación de la producción de Biogás en sistemas de dos etapas usando un reactor anaerobio de lecho fijo estructurado (ASTBR) y reactor metanogénico escalonado (RME) alimentado con licor de pentosas. Tesis de pregrado. Universidad Antonio Nariño. 2018.

alimento y del efluente, en los primeros 18 días de operación, fueron sin inóculo y a partir del día 20 se realizó la inoculación, cabe resaltar que después de haber realizado la inoculación, los valores tienden a ser constantes y mantenerse en un mismo rango, a diferencia de los días en los cuales no se había realizado la inoculación, donde los datos varían de forma drástica, lo que nos lleva a concluir, que es la etapa de adaptación del reactor y es más efectivo el porcentaje de remoción, cuando hay presencia del lodo granular.

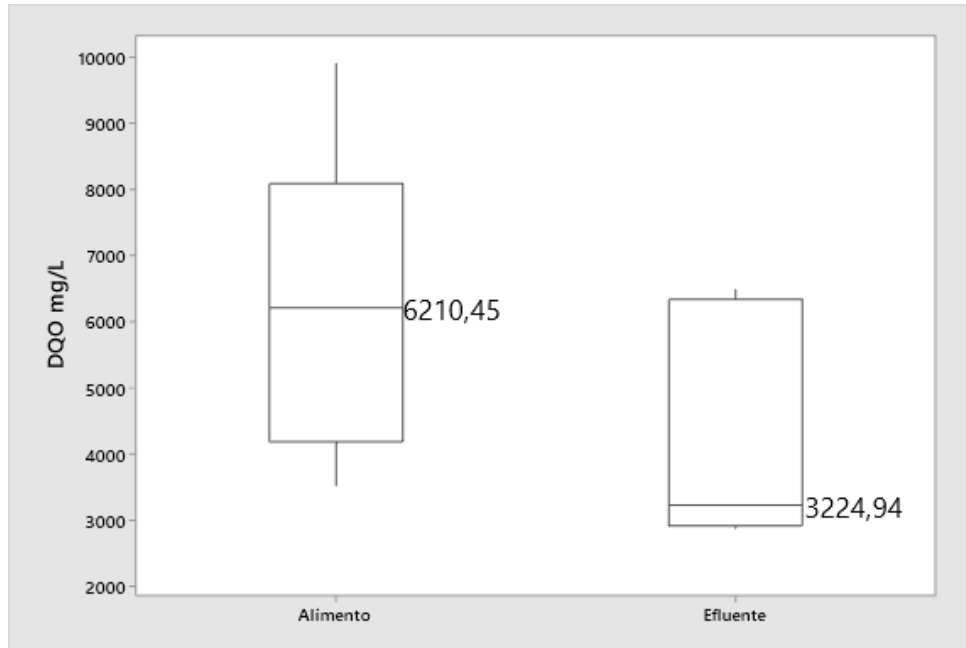
En los diagramas de caja que se presentan a continuación realizados en minitab 2019, se puede observar la dispersión de los datos obtenidos a lo largo de la operación con inoculación artificial con lodo granular e inoculación natural respectivamente.

Diagrama de caja DQO inoculación artificial



Fuente: Elaboración propia en MINITAB 19

Diagrama de caja DQO inoculación natural



Fuente: Elaboración propia en MINITAB 19

Para la medición de sólidos del lecho estructurado, al igual que en los sólidos del mismo, se tomó como base Standard Methods ⁷¹, donde inicialmente se recolecto muestra del lecho estructurado, como se puede observar en la ilustración de la muestra del lecho estructurado, posteriormente se tomaron 3 muestras de esta, una de la parte inferior, una de la parte central y una se la parte superior, cada una con longitud de 3 cm, se pesaron las cápsulas después de haber estado por 24 horas en el horno a 115°C, cada una se las espumas, se puso en cada una de las capsulas pesadas previamente, como se puede observar en la ilustración correspondiente a las muestras de espuma central, inferior y superior, se tomó el peso 2, que corresponde al peso de la espuma, más el agua, pasaron al horno durante 2 horas, se sacaron y se dejaron en el desecador de vidrio durante 40 minutos, posteriormente se tomó el peso 3 correspondiente a la cápsula más la espuma, y por último, se dejaron en la mufla durante 1 hora a 550°C y en el desecador durante 1 hora, se procedió a tomar el peso 4 correspondiente al peso de la capsula más inorgánicos.

⁷¹ Tran, T. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23nd edition. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23nd Edition, 1545. 2017.

Ilustración muestra del lecho estructurado



Fuente: Elaboración propia

Ilustración muestras de espuma inferior, central y superior



Fuente: Elaboración propia

Para la medición de los sólidos totales fijos y volátiles del efluente, se tomó como base, el Standard Methods⁷², donde inicialmente se tomó el peso 1, correspondiente al peso de la capsula vacía, se introdujo la muestra líquida (15mL) del efluente, es decir de la salida del reactor a la estufa a 110°C durante 1 hora, posteriormente se dejó en el desecador por 1 hora más y se tomó el peso 2, que corresponde al peso de la capsula, más la muestra menos el agua, se dejaron en la mufla a 550°C durante dos horas y en el desecador por una hora para obtener el dato de peso 3, el cual corresponde a la capsula más orgánicos. Es necesario añadir que la medición de sólidos, solo se hizo después de haber realizado la inoculación artificial con lodo granular.

⁷² Tran, T. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23nd edition. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater, 23nd Edition, 1545. 2017.