

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE  
CASCARILLA DE ARROZ CON ALTO CONTENIDO DE ZINC**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AMBIENTAL**

**LUIS MAURICIO MENDIETA ORELLANA**  
luis.mendieta@epn.edu.ec

**DIRECTOR: CRISTINA ALMEIDA**  
cristina.almeidan@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: DRA. ANA LUCÍA BALAREZO**  
ana.balarezo@epn.edu.ec

**Quito, abril 2020**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Luis Mauricio Mendieta Orellana declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**LUIS MAURICIO MENDIETA ORELLANA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Mauricio Mendieta Orellana, bajo mi supervisión.

---

**ING. CRISTINA ALMEIDA**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

**DRA. ANA LUCÍA BALAREZO**  
**CO-DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

A mi padre por sacrificarse toda mi carrera universitaria él solo, con paciencia, alegría, paz y bondad. Todo lo que soy hoy en día se lo debo a él, mi agradecimiento eterno.

A mis tutores Ing. Cristina Almeida y Dra. Ana Lucía Balarezo por ser las mejores profesionales con las que se puede trabajar, estar pendientes del desarrollo de este proyecto, por sus conocimientos y experiencia que fue fundamental para alcanzar mi meta.

Al Ing. Sebastián Taco por su generosidad y ayuda con el espacio en el laboratorio de Termodinámica, los equipos y los materiales necesarios para los ensayos del proyecto.

A la Dra. María Eugenia Moncayo y al Ing. André Manzano, por enseñarme a madurar como persona, amar lo que hago y entender a las personas, siempre estarán presentes sus sabios consejos en cada decisión que tome como profesional.

A Mary, mi amiga y novia, por acompañarme en cada muestreo, análisis y medición, por estar siempre que te necesitaba, gracias por ayudarme a alcanzar mis sueños.

Finalmente para Anita y Katty por su apoyo, cariño y paciencia todos estos años juntos, con quienes tengo los mejores recuerdos de la universidad. A mi amiga Lichita por ser incondicional y el mejor ejemplo de persona para mí.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi padre, Luis Mendieta quién siempre estuvo a mi lado con su apoyo incondicional, por brindarme la fortaleza de siempre seguir adelante con sus sabios consejos. Gracias por darme todo por mí, entregarme su tiempo y luchar para regalarme esta oportunidad de ser un profesional

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
PRESENTACIÓN .....	XV
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	3
CAPÍTULO 2 .....	5
MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. PRODUCCIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ EN EL ECUADOR .....	5
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	6
2.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS .....	6
2.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y BIOQUÍMICA .....	7
2.3. USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	8
2.3.1 MATERIAL ADSORBENTE DE METALES PESADOS .....	8
2.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE RESIDUOS DE CASCARILLA DE ARROZ CONTAMINADOS CON ZINC .....	9

2.4.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA .....	10
2.4.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE .....	10
2.5. ALTERNATIVAS DE REVALORIZACIÓN .....	11
2.6. DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	12
2.6.1. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	13
2.6.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	15
2.7.1 FACTORES DETERMINANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	17
CAPÍTULO 3 .....	20
METODOLOGÍA .....	20
3.1 TRATAMIENTO PREVIO DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	20
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO .....	20
3.3 ADSORCIÓN DE ZINC EN LA CASCARILLA DE ARROZ .....	21
3.4 ACONDICIONAMIENTO DEL INÓCULO .....	22
3.4.1 ACTIVIDAD METANOGENICA EN EL INÓCULO .....	22
3.5 CARACTERIZACIÓN DE INÓCULO .....	24
3.6 MODELO EXPERIMENTAL .....	25
3.6.1 DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL .....	25
3.6.2 ENSAYO DE POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN .....	26
CAPÍTULO IV .....	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
4.1 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.....	29
4.2 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL INÓCULO. ....	32
4.3 REGISTRO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	34
4.4 COMPARACIÓN DE LOS VALORES INICIALES Y FINALES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	38
4.5 PRODUCCIÓN ESPECÍFICA ACUMULADA DE BIOGÁS .....	42

CAPÍTULO V.....	46
5.1 CONCLUSIONES.....	46
5.2 RECOMENDACIONES .....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	6
TABLA 2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	7
TABLA 2.3 COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	7
TABLA 2.4 PARÁMETROS PARA LA ADSORCIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	8
TABLA 2.5 PORCENTAJE DE MANEJO DE CASCARILLA DE ARROZ. ....	9
TABLA 2.6 VALORES ÓPTIMOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	13
TABLA 2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	16
TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BIOGÁS .....	16
TABLA 3.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	21
TABLA 3.2 ADSORCIÓN DE ZINC EN LA CASCARILLA DE ARROZ .....	21
TABLA 3.3 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL INÓCULO .....	25
TABLA 3.4 RELACIÓN I-S CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ZINC .....	26
TABLA 4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ .....	29
TABLA 4.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL INÓCULO .....	32
TABLA 4.3 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DESPUÉS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	38
TABLA 4.4 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	41
TABLA 4.5 VALORES DE P ENTRE ENSAYOS (PRUEBA DE TUKEY) .....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA .....	19
FIGURA 3.6 GRÁFICA DE PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO EN EL INÓCULO .....	24
FIGURA 4.1 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS (mL/día) .....	35
FIGURAS 4.2 VOLUMEN ACUMULADO DE BIOGÁS (mL) .....	37
FIGURA 4.3 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE BIOGÁS (mL/g SV).....	41
FIGURA 4.4 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE BIOGÁS (L/g SV) .....	43

## SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

**AGV:** Ácidos Grasos Volátiles

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**AT:** Alcalinidad Total

**AME:** Actividad Metanogénica Específica

**CaCO<sub>3</sub>:** Carbonato de Calcio

**CE:** Conductividad Eléctrica

**CFN:** Corporación Financiera Nacional

**CH<sub>3</sub>COO:** Acetato

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**C/N:** Relación Carbono Nitrógeno

**CO:** Monóxido de Carbono

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono

**°C:** Grados Celsius

**DA:** Digestión Anaerobia

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

**ha:** Hectárea

**H<sub>2</sub>O:** Agua

**INEC:** Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

**LDIA:** Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental

**MEER:** Ministerio de Electricidad y Energía Renovable

**NaHCO<sub>3</sub>:** Bicarbonato de sodio

**N<sub>2</sub>:** Nitrógeno molecular

**NaCl:** Cloruro de sodio

**NaOH:** Hidróxido de sodio

**R10:** Reactor con concentración de 10 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R30:** Reactor con concentración de 30 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R50:** Reactor con concentración de 50 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R70:** Reactor con concentración de 70 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R100:** Reactor con concentración de 100 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R150:** Reactor con concentración de 150 mg/L de zinc en cascarilla de arroz

**R0:** Reactor con cascarilla de arroz sin adición de zinc

**R-LODO:** Blanco sin sustrato

**pH:** Potencial de Hidrógeno

**rpm:** Revoluciones por minuto

**SiO:** Monóxido de silicio

**SO<sub>2</sub>:** Dióxido de azufre

**SV:** Sólidos Volátiles

**T:** Tonelada

**μm:** micrómetros

**Zn:** Zinc

**ZnCl<sub>2</sub>:** Cloruro de Zinc

## RESUMEN

La remoción de metales pesados mediante el uso de la cascarilla de arroz es una alternativa que se mejora continuamente. Al obtenerse un residuo contaminado de cascarilla de arroz se busca revalorizarlo y eliminar la contaminación ambiental mediante la aplicación de la digestión anaerobia. Sin embargo, se ha encontrado zinc en la cascarilla de arroz que podría afectar la cantidad y calidad del biogás. Por lo cual el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar la producción de biogás a partir de la cascarilla de arroz con diferentes concentraciones (10, 30, 50, 75, 100, 150) mg/L de zinc para determinar cuál es la máxima concentración que no genera efectos tóxicos en las bacterias metanogénicas.

El estudio se realizó a escala de laboratorio, se utilizó como inóculo estiércol bovino que se maduró durante 3 meses a 35 °C. El sustrato fue sometido a una reducción de tamaño de partícula a valores  $\leq 150\mu\text{m}$ , se realizó un proceso de adsorción a partir de  $\text{ZnCl}_2$  para añadir  $\text{Zn}^{+2}$  al sustrato con diferentes concentraciones. La relación inóculo-sustrato del proceso de digestión anaerobia fue de 3:1, incubada a 39 °C a baño maría por 63 días. El biogás se midió mediante el método de desplazamiento de líquido con una solución de NaCl al 95%. Se evaluaron las características fisicoquímicas del lodo anaerobio antes y después del experimento para descartar inhibición de la metanogénesis por factores diferentes al zinc.

Los resultados obtenidos indican que la cascarilla de arroz libre de zinc presenta el mejor proceso metanogénico, obteniendo 15.52 L/g SV de biogás. La metanogénesis, y por ende en la producción de biogás, se vio afectada por concentraciones de zinc superiores a 70 mg/L. Las inhibiciones se produjeron cuando la cascarilla de arroz presentó concentraciones de 100 y 150 mg/L de zinc al día 58 y 51, respectivamente.

**Palabras clave:** Digestión anaerobia, cascarilla de arroz, biogás, metanogénesis, contaminación con zinc.

## ABSTRACT

The removal of heavy metals through the use of rice husk is an alternative that is continuously improved. By obtaining a contaminated residue from rice husk, it is sought to revalue it and eliminate environmental contamination through the application of anaerobic digestion. However, zinc has been found in the rice husk that could affect the quantity and quality of the biogas. Therefore, the objective of this research work was to evaluate the biogas production from rice husk with different concentrations (10, 30, 50, 75, 100, 150) mg / L of zinc to determine what is the maximum concentration that does not generate toxic effects on methanogenic bacteria.

The study was carried out on a laboratory scale, bovine manure was considered as an inoculum that matured for 3 months at 35 °C. The substrate was sometimes a reduction in particle size to values  $\leq 150 \mu\text{m}$ , an adsorption process was carried out from  $\text{ZnCl}_2$  to add  $\text{Zn}^{+2}$  of different complications to the substrate. The inoculum-substrate ratio of the anaerobic digestion process was 3: 1, incubated at 39°C in a water bath for 63 days. Biogas was measured by the liquid displacement method with a 95% NaCl solution. The physicochemical characteristics of anaerobic sludge were evaluated before and after the experiment to rule out inhibition of methanogenesis by factors other than zinc.

The results obtained indicate that the zinc-free rice husk has the best methanogenic process, obtaining 15.52 L/g SV of biogas. Methanogenesis and therefore the biogas production was affected by zinc concentrations greater than 70 mg/L. Inhibitions occur when the rice husk presented concentrations of 100 and 150 mg/L of zinc on day 58 and 51, respectively.

**Keywords:** Anaerobic digestion, rice husk, biogas, methanogenesis, contamination with zinc.

## PRESENTACIÓN

En el Capítulo I se describe la introducción, objetivos, alcance y justificación de la presente investigación.

El Capítulo II es el marco teórico, incluye la problemática ambiental de los residuos contaminados con zinc y varias propuestas para la revalorización o usos. Describe las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz, las condiciones a las que se realiza la adsorción de zinc en la cascarilla de arroz a escala de laboratorio. Además, se describe el proceso biológico de producción de biogás por medio de las fases de la digestión anaerobia.

El Capítulo III describe la metodología utilizada en esta investigación y contiene el modelo experimental detallando los materiales utilizados, incluyendo su procedencia. Además, el proceso para obtener una adsorción aproximada del 70% de zinc en la cascarilla de arroz.

En el Capítulo IV se encuentran los resultados obtenidos y se establecen comparaciones con otros estudios. También se presenta el análisis de datos de la producción diaria de biogás y su producción acumulada.

En el Capítulo V se presentan las conclusiones y las recomendaciones de la presente investigación.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y los anexos referentes a esta investigación.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

En la actualidad un problema crítico para la sociedad es el desarrollo de la actividad industrial que genera residuos de metales pesados tales como: cadmio, plomo, arsénico o zinc. Estas sustancias se bioacumulan o distribuyen en el ambiente derivando graves problemas de contaminación (Sáez et al., 2014).

El zinc es un metal pesado que se encuentra presente en concentraciones traza en muchos sistemas biológicos, constituyéndose en un elemento esencial de la dieta biótica (Zhang et al., 2017). Se encuentra como resultado de la actividad antrópica, presente en pesticidas, en la industria del galvanizado, uso de techos de zinc en viviendas y galpones que a mediano o largo plazo se corroen y llega a ser tóxico para los humanos, animales o microorganismos (Sherwinca, 2015). Por ejemplo, Bautista (2016) afirma que el zinc inhibe la actividad metanogénica a 150 mg/L.

Son los residuos de origen vegetal uno de los principales afectados por la contaminación de zinc. Más del 65% de los residuos de cascarilla de arroz no son revalorizados, se esparcen al ambiente, se desechan en quebradas o ríos, o se queman en áreas abandonadas (Castro et al., 2016).

La cascarilla de arroz se utiliza en la depuración de aguas residuales que contienen metales pesados, cuenta con características fisicoquímicas para ser un buen material adsorbente. A pesar de esto, después de que se satura, la cascarilla debe ser eliminada. Una mala gestión del adsorbente saturado podría volver a contaminar una matriz ambiental (Camara, 2018). Por esta razón se propone una alternativa para neutralizar nuevamente este residuo (Bonetta et al., 2014).

La producción de biogás a partir de la biodigestión es otra opción de gestión de residuos agrícolas. Presenta ventajas sobre los combustibles tradicionales (carbón, petróleo, gas natural), se produce en cualquier latitud, y es de bajo costo. Además, reutiliza materiales desaprovechados (Morales, 2018).

La finalidad de este trabajo fue producir biogás a partir de cascarilla de arroz con diferentes contenidos de zinc para determinar la máxima concentración que inhibe el proceso metanogénico y la influencia del zinc en la producción de biogás. Este estudio sirve como una referencia para generar energías limpias y eficientes a través del uso de este residuo con diferentes concentraciones de zinc en su estructura. Al mismo tiempo se brinda información de la caracterización de este residuo.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la producción de biogás a partir de cascarilla de arroz con alto contenido de zinc, para conocer la concentración máxima permisible que no produzca efectos tóxicos en las bacterias metanogénicas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar físico-químicamente el sustrato mediante la determinación del porcentaje de sus principales componentes (lignina, hemicelulosa y cenizas) para conocer si existe influencia en la generación de biogás.
- Determinar la actividad metanogénica del lodo anaerobio en ausencia de sustrato, a través de pruebas de laboratorio, para conocer su calidad.
- Cuantificar la cantidad de metano producido a través de la prueba de desplazamiento de líquido, con la finalidad de conocer con que concentraciones de zinc se producirá un cambio en la generación de biogás.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

Buscando un inicio para el autoconsumo, el uso de recursos agrícolas en abundancia y gratuitos es la forma más limpia para generar energía, además de ser amigable con el ambiente y no ser perjudicial para la salud humana (Chávez & Rodríguez, 2016).

En la última década se han presentado numerosos proyectos de producción de energías renovables como la digestión anaerobia. Empleando lodos anaerobios con sustratos de residuos agrícolas como parte del proceso para la obtención de energía (Corredor & Pérez, 2018).

La cascarilla de arroz es una materia prima capaz de alimentar al proceso microbiológico debido a que posee un equilibrio de sales minerales. Previamente debe ser sometida a una reducción de tamaño de partícula para liberar sustancias que puedan transformarse y aprovecharse para el proceso de digestión anaerobia, teniendo en cuenta que no están disponibles directamente por su alto contenido de lignina (Reyes, 2017).

La digestión anaerobia trata de manera eficiente a los residuos orgánicos y es conveniente con respecto a tratamientos anaerobios en cuanto a costos, diseños sencillos y procesos que no son complejos (Parra, 2015).

Metodológicamente la digestión anaerobia es justificada por Llanos (2016), sustenta que el proceso ideal para conocer la calidad inicial del lodo anaerobio es realizando un análisis de actividad metanogénica con valores aproximados a 0 – 2g DQO CH<sub>4</sub>/g SV-día, relación (C/N) entre 20:1 – 30:1. Es importante mantener el inóculo con valores de sólidos volátiles entre 10 – 20 g/L SV y nitrógeno total 3 - 12 mg/g. La cascarilla de arroz tiene propiedades adsorbentes cercanas al 70% de eficiencia y mayor eficacia con un diámetro de partícula de 150 µm (Asimbaya, 2016).

Baweja et al., (2018), analizan la relación inóculo-sustrato indicando que a partir de relaciones  $\geq 3:1$  serán óptimas la producciones de biogás. Palau & Virginia

(2016), establecen que la reproducción del experimento se puede realizar en reactores batch controlando la temperatura a 39 °C para permitir el desarrollo normal de las bacterias metanogénicas y el pH entre 6.5 – 8, para no crear un ambiente tóxico. Finalmente busca condiciones de ausencia de O<sub>2</sub> para mantener a los microorganismos metanogénicos estables y así generar una buena producción de CH<sub>4</sub> (Astals et al., 2015).

De forma práctica es justificable debido a que la digestión anaerobia es una técnica utilizada en todo el mundo, pero las condiciones en cada país son diferentes por lo que en Ecuador un proyecto que contempla el uso de un sustrato de cascarilla de arroz con diferentes cantidades de zinc favorecerá en la selección de sustrato contaminado, y dará a conocer cuáles serán las eficiencias de la producción de biogás. Además, de incentivar al reciclaje disminuyendo el volumen de cascarilla que es arrojada al ambiente e impedir el aumento de la contaminación ambiental buscando mejorar sus condiciones sanitarias (Rojas, 2018).

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. PRODUCCIÓN DE CASCARILLA DE ARROZ EN EL ECUADOR**

El cultivo de arroz es el cuarto más extenso en el Ecuador, está localizado principalmente en la región Costa. La mayor superficie de terrenos cosechados se encuentra en la provincia del Guayas con 237.17 ha, seguido de Los Ríos con 107.27 ha y Manabí con una aportación de 17.74 ha (INEC, 2016).

El arroz después del banano, caña de azúcar y palma africana es el producto que más importancia tiene para la dinamización de la agricultura en el país, es el principal producto de consumo de los ecuatorianos (CFN, 2018).

El arroz no es un alimento que se encuentra directamente listo para su consumo; debe seguir procesos de inspección para cumplir requerimientos establecidos por laboratorios, como el contenido de humedad hasta 25%, 5% de impurezas y 20% de grano partido. Se realizan procesos de pre limpieza del grano para eliminar residuos agregados tras la cosecha, secado y el descascarado. De esta forma se obtiene el grano para el consumo y la cascarilla como desecho (Rengifo et al., 2018).

Datos del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), por medio de estudios de bioenergía revelan que la cascarilla de arroz o grano partido en promedio corresponde al 22% del total de la producción (MEER, 2015). A pequeña escala la cascarilla se utiliza para aislamientos térmicos, abono, procesos de combustión en ladrilleras, y secadoras de grano (Tipanluisa et al., 2015).

## 2.2. PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOQUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ

La estructura de la cascarilla de arroz presenta un volumen poroso del 54%, posee un coeficiente de conductividad térmica de 0.04 W/mK. La cascarilla de arroz sirve como componente principal de sistemas de aislamiento térmico, además posee comportamiento ignífugo, alta estabilidad bioquímica y contiene alta concentración de silicio (90 al 97% SiO), es rica en componentes lignocelulósicos (Llanos, 2016).

### 2.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS

La cascarilla de arroz es el producto secundario del proceso de obtención de arroz, posee muy pocas aplicaciones, por lo que se considera un desecho. Tiene forma de canoa, superficie rugosa, pesa entre 2.9 y 3.5 mg. Sus dimensiones dependen de la variedad, generalmente son de 4 a 14 mm de largo, 50  $\mu\text{m}$  de espesor y de 2 a 4 mm de ancho, posee un color pardo rojizo (Asimbaya, 2016).

Posee un peso específico bajo de 8.0 ton/ m<sup>3</sup> que dificulta su transporte, densidad aparente sin compactar 0.11 g/cm<sup>3</sup>, densidad aparente compactada 0.14 g/cm<sup>3</sup>. En la Tabla 2.1 se detallan más propiedades físicas de la cascarilla de arroz.

**TABLA 2.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Capacidad de aireación	79.5	%
Poder calórico	3281.6	kcal /kg
Humedad	10.0	%
Porosidad	54.0	%
Conductividad térmica	0.1	W/m.K

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Centeno & Rodríguez, (2018) y Rojas, (2018)

## 2.2.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Las propiedades químicas de la cascarilla de arroz se presentan en la Tabla 2.2. La sílice a altas temperaturas desarrolla un aglomerante que es difícil de romper, lo que podría complicar la digestión anaerobia generando sobrenadantes en el inóculo que no sean digeribles por las bacterias (Gutiérrez et al., 2018).

**TABLA 2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Componente	Valor	Unidad
Carbono	37.6 – 42.6	%
Hidrógeno	4.7 – 5.7	%
Azufre	≤ 0.2	%
Oxígeno	31.4 – 37.6	%
Nitrógeno	0.4 – 1.8	%

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Gutiérrez et al., (2018)

La cascarilla de arroz se compone por tres polímeros: celulosa, lignina y hemicelulosa (Llanos, 2016). Uno de los componentes que se encuentra en mayor cantidad es la celulosa; los valores se describen en la Tabla 2.3 (Rojas, 2018).

**TABLA 2.3 COMPOSICIÓN BIOQUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Componente	Valor	Unidad
Celulosa	25.9 – 35.5	%
Hemicelulosa	18.1 – 21.4	%
Lignina	18.2 – 24.6	%

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Centeno & Rodríguez, (2018) y Rojas, (2018)

## 2.3. USO DE LA CASCARILLA DE ARROZ

### 2.3.1 MATERIAL ADSORBENTE DE METALES PESADOS

La adsorción es un proceso que consiste en la captación activa o pasiva de iones metálicos. La cascarilla de arroz tiene propiedades para enlazar y acumular varias clases de contaminantes, esto es posible gracias a la unión física (fuerzas de London) o mediante la unión química (iónica o covalente) en la que se denomina adsorbente al material que se unirá con el metal, y adsorbato a la especie química adsorbible (Tejada et al., 2015).

Entre las ventajas de realizar la adsorción en cascarilla de arroz en comparación con otros métodos es de bajo costo, eficiente, reduce significativamente los productos químicos residuales y no se requieren nutrientes adicionales. Sin embargo, la temperatura, pH, diámetro de la partícula, afectan de forma positiva o negativa al ensayo de acuerdo a las características del material adsorbente. Para cumplir correctamente con la adsorción específicamente del zinc en cascarilla de arroz se deben cumplir las siguientes condiciones como se especifica en la Tabla 2.4 (Doria et al., 2016).

**TABLA 2.4 PARÁMETROS PARA LA ADSORCIÓN DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Nº	Parámetro	Valor	Unidad
1	Tiempo de contacto	4.0 – 5.0	h
2	pH	5.3 – 5.7	-
3	Velocidad de agitación	150.0	rpm
4	Tamaño de partícula	≤150.0	µm
6	Temperatura	19.0	°C
7	Masa	0.5 - 1.5	g

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Doria et al., (2016)

## 2.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE RESIDUOS DE CASCARILLA DE ARROZ CONTAMINADOS CON ZINC

La cascarilla de arroz acarrea problemas ambientales al aire y agua debido a la escasa formulación de estrategias para su gestión. El manejo del sobrante de cascarilla de arroz que no es reutilizado de las piladoras se da de la siguiente forma, mostrada en la Tabla 2.5 (Sherwinca, 2015).

**TABLA 2.5 PORCENTAJE DE MANEJO DE CASCARILLA DE ARROZ.**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Quemada dentro de piladoras	50	%
Tirada en bordes de carreteras	15	%
Quemada en terrenos aislados	15	%
Quemada en bordes de carreteras	10	%
Tirada a ríos	5	%
Pérdida a causa del viento	5	%

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Salinas, (2019)

La cascarilla de arroz tiene baja biodegradabilidad encontrándose largos periodos de tiempo a la intemperie y expuesta a la contaminación, generando acumulación de grandes volúmenes en extensas áreas (Salinas, 2019).

El zinc está presente en la composición de herbicidas o plaguicidas necesarios para tratamientos químicos para el control fitosanitario o de malezas que se realiza en los sembríos de arroz. Sin embargo, el uso excesivo y constate incrementa el porcentaje de zinc presente en los residuos de cascarilla de arroz

almacenando componentes nocivos en su estructura y conduciendo a problemas ambientales (Delgado & Cabrera, 2017).

El problema del uso de la técnica de adsorción para la descontaminación de aguas residuales utilizando cascarilla de arroz con la ayuda de agentes activantes para retener metales pesados es que genera un sustrato contaminado (Ortiz, 2018).

#### **2.4.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA**

El 5% de cascarilla de arroz que es arrojada a ríos normalmente es cercana a las piladoras, lo que ocasiona una gran acumulación en el cuerpo de agua incremento sus nutrientes y favoreciendo al crecimiento de algas. Evita que la luz solar ingrese a capas inferiores disminuyendo la vegetación acuática del fondo, y por ende generando proliferación de bacterias del fondo del agua que consumen rápidamente el oxígeno disuelto, produciendo mal olor, vectores y estancamientos (Borrás, 2018).

Al mismo tiempo, el cambio de las propiedades del agua como la turbidez y conductividad ocasionada por la acumulación de cascarilla de arroz contaminada por zinc dificulta la vida acuática, provocando bioacumulación de zinc en las especies acuáticas e incrementando la concentración de este metal en el agua. De esta forma se generan problemas en los seres humanos que están en contacto con este tipo de agua contaminada (Barrera & Manobanda, 2018).

#### **2.4.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

La práctica más común realizada es la quema de la cascarilla de arroz contaminada, resulta mucho más económico y no representa gastos extras. Caso contrario el transporte desde el lugar de producción hasta los gestores ambientales presenta altos costos para su transporte, debido a su bajo peso específico ( $100 \text{ kg/m}^3$ ) (Sierra & Acevedo, 2016).

Las cenizas y el calor de la combustión de la cascarilla de arroz son aprovechados ya sea para energía o procesos productivos, derivado de estos procesos se origina otro producto que son los gases perjudiciales como:  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  que a causa de las corrientes de aire son desplazados afectando especies terrestres y acuáticas más lejanas (Corredor & Pérez, 2018).

## **2.5. ALTERNATIVAS DE REVALORIZACIÓN**

Existe una necesidad para desarrollar nuevas formas de explorar los recursos, evaluando diferentes alternativas tecnológicas para hacer que los residuos intervengan en procesos productivos para aprovechar su potencial y reducir la contaminación ambiental. Dadas estas circunstancias surgen diferentes procesos aplicados a la ingeniería que permiten innovar y darles otra oportunidad a productos residuales como es la cascarilla de arroz (Abadía y Melgarejo, 2017).

Los sistemas de tratamiento como composteo o incineración y separación han sido muy utilizados y con mayor aceptación a nivel mundial. No obstante, el desinterés público por no invertir en procedimientos eficientes hace que no se preserve los intereses ambientales dejando de utilizarlos. La pirólisis, la hidrólisis y la digestión anaerobia contribuyen de manera importante al suministro de energía del futuro gracias a la presión social que se ejerce para cuidar el ambiente, siendo procesos viables por la abundante materia prima generada (Arhuon, 2017).

La metodología de las 3R, reducir, reusar y reciclar se aplica para la cascarilla de arroz, dando un valor agregado al residuo, favoreciendo el aprovechamiento y mejorando su rendimiento económico al ser transformado en una energía alternativa (Chávez & Rodríguez, 2016).

No arrojar residuos de carbón de cascarilla de arroz a sitios ya contaminados es parte de estas alternativas, pudiendo emplear este carbón como sustrato convencional o sustrato hidropónico en las flores, específicamente en claveles y rosas para incrementar los nutrientes que llegan a la planta a través del agua. Además, se puede utilizar la cascarilla de arroz como material de construcción

para el agarre de ladrillos y baldosas, o en la mezcla de mini hormigones reemplazando la arena por este residuo (Abad y Bonilla, 2016).

A más de esto se puede generar biogás a partir de la digestión anaerobia para ser utilizada a nivel doméstico siendo una alternativa de tratamiento de reúso con procesos amigables al ambiente y de impacto limitado donde las bacterias degradan la materia orgánica y existe una alta recuperación de energía relacionada con el proceso que la hace viable económicamente (Ripley, 2014).

## **2.6. DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual se degrada la materia orgánica (residuos animales y vegetales) sin la presencia de oxígeno, existe una estabilización orgánica gracias a la eliminación de estos residuos obteniendo energía (Palau, 2016). Se transforman en un gas compuesto principalmente por  $\text{CH}_4$  (60%) y  $\text{CO}_2$  (40%) (Arhuon, 2017).

Este proceso ocurre naturalmente en ambientes donde no hay presencia de oxígeno, tractos gastrointestinales o sedimentos de lagos. Hay condiciones que se pueden crear para simular un hábitat en el que se desarrolle un incremento de las poblaciones bacterianas, las bacterias anaeróbicas productoras de metano pueden vivir en temperaturas de rangos mesófilos y a pH neutro (Acarley, 2018).

La función de enzimas respiratorias las desempeñan los microorganismos metanogénicos, y conjuntamente con los no metanogénicos forman una cadena alimentaria. A causa de este proceso los microorganismos tienen alimento constantemente y los residuos orgánicos se transforman totalmente en biogás que emerge del sistema (Corrales et al., 2015).

A escala de laboratorio se cumple eficazmente el proceso de digestión anaerobia cuando cumple las siguientes condiciones como se especifica en la Tabla 2.6.

**TABLA 2.6 VALORES ÓPTIMOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Nº	Parámetro	Valor	Unidad
1	<sup>1</sup> Temperatura	35.0 – 39.0	°C
2	<sup>1</sup> Sólidos volátiles	10.0 – 20.0	%
3	<sup>3</sup> Relación C/N	30/1 – 20/1	-
4	<sup>1</sup> pH	6.5 – 8.0	-
5	<sup>2</sup> Alcalinidad	1500.0-3000.0	mg CaCO <sub>3</sub> /L
6	<sup>2</sup> Relación AGV/AT	<0.6	-

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** (1) Bautista, (2016); (2) Morales, (2018); (3) Asimbaya, (2016).

## 2.6.1. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

### 2.6.1.1. FASE HIDROLÍTICA

Es la primera fase de la digestión anaerobia, los organismos hidrolíticos o anaerobios estrictos como bacteroides, bacterias facultativas y clostridium transforman materiales orgánicos de tamaños grandes como lípidos, polisacáridos, proteínas y grasas entre otros, a materiales orgánicos más solubles o pequeños por medio de enzimas extracelulares producidas por ciertos microorganismos (Adekunle & Okolie, 2015).

Esta etapa es fundamental porque la materia orgánica se convierte en sustrato, fuente de alimento de los microorganismos, la cual no podrá ser digerido si las moléculas orgánicas son muy grandes. De esta forma se liberan azúcares y su transformación es lenta puesto que se encuentran contenidos en la celulosa (Parra, 2015).

Una vez que han actuado los organismos hidrolíticos, los compuestos son transformados en ácidos grasos de cadenas cortas y posteriormente serán degradados a ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno en próxima fase (Acarley, 2018).

### 2.6.1.2. FASE ACIDOGÉNICA

Los compuestos simples son absorbidos por las bacterias facultativas, luego de esto se degradan en ácidos orgánicos de cadena corta como ácido butírico, propiónico, acético, hidrógeno y dióxido de carbono (Corrales et al., 2015).

Durante esta fase son transformados los azúcares simples, ácidos grasos y aminoácidos en alcoholes y ácidos orgánicos. Si la presión parcial de hidrógeno incrementara, esto sería indicio de la disminución de componentes reducidos que fueron generados durante el proceso de la fermentación (Rojas, 2018).

Hay lugar a la fermentación de moléculas orgánicas solubles, que pueden ser procesadas directamente por las bacterias metanogénicas y compuestos orgánicos. Además, la importancia de estas bacterias es la eliminación de las trazas de oxígeno que quedan en el proceso (Gutiérrez et al., 2018).

### 2.6.1.3. FASE ACETOGÉNICA

Los productos procedentes de la fase acidogénica se consumen como sustrato para los microorganismos acetogénicos. Los que no pueden ser convertidos directamente a metano se convierten en sustratos metanogénicos, ácidos grasos volátiles y alcoholes, serán oxidados en sustratos como acetato, hidrógeno y AGV con cadenas largas de carbono, siendo indispensable que los organismos que realicen las reacciones de oxidación lo hagan en conjunto con los microorganismos formadores de metano (Parra, 2015).

Los organismos acetogénicos encargados de la metabolización a hidrógeno y acetato son *Syntrophomonas wolfei* y *Styntrophobacter volini*, un tipo especial de microorganismos acetogénicos, llamados comúnmente homoacetogénicos, crecen en presencia de azúcar y producen únicamente acetato. Estas bacterias consumen hidrógeno en vez de producirlo como resultado del metabolismo (Gutiérrez et al., 2018).

#### **2.6.1.4. FASE METANOGÉNICA**

Por último, está la metanogénesis que es el último proceso de la descomposición anaerobia y se lleva a cabo bajo condiciones anaerobias estrictas a partir de productos intermediarios. Es el proceso más importante dado que las reacciones bioquímicas se producen lentamente y completan el proceso de digestión anaerobia (Acarley, 2018).

Las bacterias metanogénicas transforman sustratos monocarbonados o unidos por enlaces covalentes como:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}$ ,  $\text{H}_2$ , formiato y metanol en  $\text{CH}_4$  con la ayuda de organismos metanogénicos que se clasifican dentro del dominio *Archaea*. Pueden ser bacilos cortos y largos, células en forma de placas, metanógenos filamentosos y tanto bacterias gram positivas como gram negativas (Adekunle & Okolie, 2015).

Los microorganismos metanógenos acetotróficos rompen la molécula de acetato por medio de la descarboxilización, la usan como sustrato y producen aproximadamente 60% - 70% de  $\text{CH}_4$  producto de la digestión anaerobia, normalmente estas bacterias regulan el pH en el proceso de eliminación del acetato y producción de  $\text{CO}_2$  que se disuelve produciendo bicarbonato (Reyes, 2017).

Los microorganismos metanógenos hidrogenotróficos usan  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  como sustratos evitando que se pierdan en el digester durante el desarrollo sobre compuestos multicarbonados, que conlleva a una mejor eficiencia termodinámica (Parra, 2015). El ácido acético es el compuesto que promueve alrededor del 50% de  $\text{CH}_4$  que proviene de la deshidrogenización del propionato y butirato en un porcentaje de 23% - 60% y de la reducción del  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2$  con 3% - 5.3% de acetato (Corrales et al., 2015).

#### **2.6.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia en su proceso presenta ventajas como desventajas como se describe en la Tabla 2.7.

**TABLA 2.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Eliminación de materia orgánica	Mal olor
Consumo de energía cercano a cero	Elimina nutrientes y patógenos
No requiere nutrientes	El tiempo de producción es considerable
Se puede aplicar a baja o alta escala	
Requiere poco espacio	
Es simple de construir	

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Parra, (2015)

## 2.7. BIOGÁS

El biogás es la mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono y otros elementos traza como impurezas que provienen del proceso de digestión anaerobia. Se obtiene a partir de los 30 días de fermentación dependiendo del material digerido como del inóculo. Cuando la composición del gas es superior al 45% en metano es inflamable (FAO, 2011).

El biogás presenta las siguientes propiedades, las cuales se indican en la Tabla 2.8

**TABLA 2.8 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BIOGÁS**

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
Composición	60 - 70% metano (CH <sub>4</sub> ) 25 - 40% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )
Contenido energético	6.0 – 6.5 kWhm <sup>-3</sup>
Equivalente de combustible	0.6 – 0.6 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Densidad normal	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido
Masa molar	16.1 kg kmol <sup>-1</sup>

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Rojas, (2018)

## **2.7.1 FACTORES DETERMINANTES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

### **2.7.1.1 METANOGÉNESIS**

La metanogénesis es la etapa más importante de la digestión anaerobia, en este proceso se produce el CH<sub>4</sub> que es el gas que se utilizará como energía. La principal vía de producción es la reducción de CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub>, la producción de CH<sub>4</sub> es muy sensible a la presencia de O<sub>2</sub>, pese a que se han realizado estudios sin células del tipo *Methanobacillus omelianskii* la producción de metano con presencia de oxígeno se sigue viendo inhibida (Yao et al., 2017).

### **2.7.1.2 pH**

Las bacterias metanogénicas presentan debilidad ante las variaciones del pH, su tasa de crecimiento se reduce significativamente con valores inferiores de 6. Provocando la desintegración de gránulos bacterianos deteniendo la producción de metano, a más de esto, crea un ambiente tóxico para las bacterias disminuyendo la calidad del biogás. Para evitar esta inhibición se han establecido rangos ideales de 6.5 – 8.0 y para obtener un biogás de máxima calidad un pH de 6.5 - 7.5 (Arhoun, 2017).

### **2.7.1.3 AGITACIÓN**

La agitación permite poner en contacto el sustrato con la población bacteriana, proporciona una densidad uniforme en el biorreactor, no permite la sedimentación del sustrato previniendo la formación de ácidos grasos volátiles, mantiene un balance interno de la temperatura evitando la formación de estratos de temperatura, favorece a la salida de gases (Villanueva et al., 2015).

### **2.7.1.4 TEMPERATURA**

La temperatura ambiente y de los reactores son los factores que tienen mayor influencia sobre la velocidad en la producción de biogás considerado parámetro principal en el diseño del modelo experimental. Los cambios bruscos de temperatura pueden ocasionar desestabilizaciones en el proceso, se debe

mantener en el rango de temperatura de los organismos mesófilos 25 – 45 °C (Gutiérrez et al., 2018).

#### **2.7.1.5 TIEMPO DE RESIDENCIA**

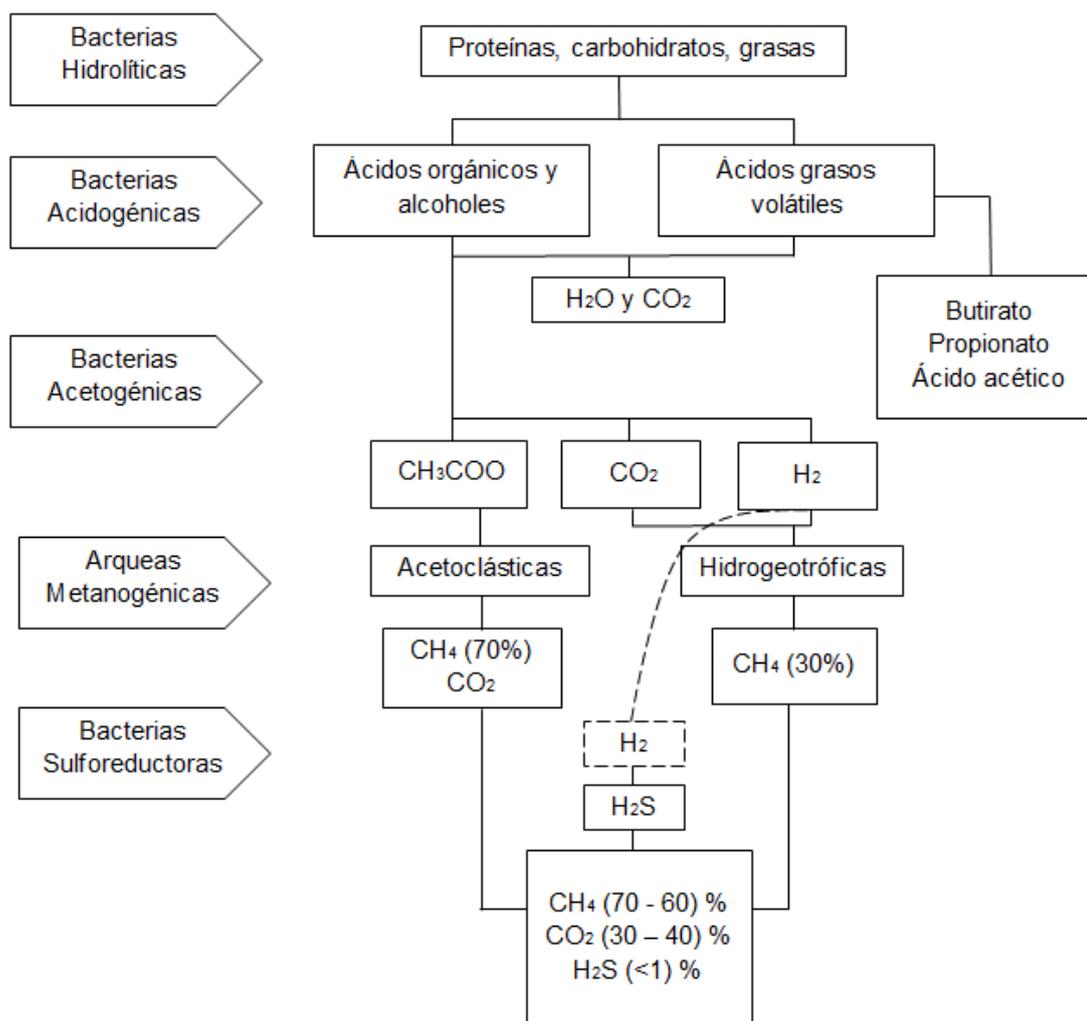
Un tiempo de residencia alrededor de 35 días como mínimo debe ser completado para el correcto desarrollo de la población bacteriana, en el que no deberán ser removidas para la producción de metano. A mayor cantidad de días en contacto inóculo y sustrato se obtendrá un incremento en la materia orgánica degradada así como en la producción de biogás (Corrales et al., 2015).

#### **2.7.1.6 ZINC**

Los alimentos como el balanceado para los animales de granja se encuentran enriquecidos con elementos como el zinc para mejorar su tasa de crecimiento con concentraciones promedio de 15.9 – 2041.8 mg/kg de Zn y en los abonos utilizados para enriquecer el pasto se tiene un promedio de 39.5 – 11379 mg/kg de Zn. Sin embargo, estos elementos no se pueden digerir completamente, 95% de ellos se excretan y permanecen expuestos al ambiente (Wang et al., 2018).

El zinc en cantidades traza que pertenecen a un lodo biológico es un nutriente esencial para las arqueas metanogénicas puesto que se compone de varias enzimas que catalizan las reacciones anaeróbicas, pero en adición y contacto directo con un lodo produce efectos de inhibición de la actividad metanogénica a concentraciones de 7.5 mg/L. Con valores superiores se produce un efecto estimulante en los sistemas anaeróbicos que se puede atribuir a la variación de la resistencia y tolerancia de los microorganismos y a la alta capacidad de precipitación y adsorción (Zhang et al., 2017).

**FIGURA 2.1 PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**



**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

**FUENTE:** Arhuon, (2017)

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 TRATAMIENTO PREVIO DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

La muestra de cascarilla de arroz utilizada en este proyecto se obtuvo de una planta piladora, en la parroquia de Bucay en la provincia del Guayas.

La cascarilla de arroz se lavó con agua potable tres veces para eliminar impurezas. Se secó durante 3 días a temperatura ambiente. Se lavó nuevamente con agua destilada dejándole secar durante 1 semana a 60 °C en una estufa de marca Durocell.

Se redujo el tamaño de partícula utilizando el molino de cuchillas del laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química. Se realizó dos trituraciones con el molino, primero se colocó el tamiz interno del molino de cuchillas número 3 y luego el tamiz interno número 1. Finalmente se tamizó la cascarilla de arroz para obtener tamaños de partícula  $\leq 150 \mu\text{m}$ .

#### **3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO**

En la Tabla 3.1 se detallan las técnicas y métodos utilizados para la caracterización del sustrato.

**TABLA 3.1 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>	<b>Método</b>
Humedad	Gravimetría	ASTM D4442-07
Cenizas	Gravimetría	ASTM D3172-02
Volátiles	Gravimetría	ASTM E872-92
Celulosa	Gravimetría	ASTM 1977B
Hemicelulosa	Gravimetría	ASTM D1109-84
Lignina	Gravimetría	ASTM D1106-96
Carbón fijo	Gravimetría	ASTM D3172-02
Nitrógeno total	Combustión	ASTM D8001-17
Alcalinidad	Volumetría	ASTM D1067-06
Zinc	Absorción atómica	PEE/F/21

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

### 3.3 ADSORCIÓN DE ZINC EN LA CASCARILLA DE ARROZ

En esta investigación se utilizó la cascarilla de arroz como medio adsorbente siguiendo la metodología de Doria et al., (2016), en la cual se especifica las condiciones para obtener aproximadamente una eficiencia del 70% en la adsorción con cascarilla de arroz.

**TABLA 3.2 ADSORCIÓN DE ZINC EN LA CASCARILLA DE ARROZ**

<b>Solución de Zn<sup>+2</sup> (mg/L)</b>	<b>Masa de cascarilla de arroz (g)</b>	<b>Adsorción de Zn en la cascarilla de arroz (mg/L)</b>
21.4	1.3	10
200	0.4	30
200	0.5	50
321	0.8	70
321	1.5	100
400	1.0	150

**Elaboración:** Mendieta, (2020)

Se utilizó  $ZnCl_2$  en estado sólido y se diluyó en agua destilada para preparar diferentes soluciones de Zn (21.4 mg/L, 200 mg/L, 321 mg/L, 400 mg/L). Las soluciones se mezclaron con la cascarilla de arroz para realizar el proceso de adsorción y para posteriormente determinar la concentración de metal por absorción atómica. Se tomó 25 mL de cada solución y se le añadió una cantidad de cascarilla de arroz como se indica en la Tabla 3.2, se agitó durante 4 horas para obtener un sustrato con diferentes concentraciones de zinc.

### **3.4 ACONDICIONAMIENTO DEL INÓCULO**

En la presente investigación se generó el inóculo a partir de excretas bovinas. El estiércol bovino que se utilizó para preparar el inóculo fue extraído de la hacienda “San Esteban” ubicada en la ciudad de Machachi.

El proceso de producción se realizó en botellas de 6 litros. Dentro de los recipientes se colocó 3 litros de agua destilada con 500 gramos de estiércol fresco. Se homogenizó diariamente el inóculo para mejorar la mezcla. El inóculo tuvo un tiempo de maduración de 3 meses a 35 °C.

Para comprobar la eficiencia del lodo previamente al experimento de digestión anaerobia y después de 3 meses de maduración, se realizó un análisis de sólidos volátiles obteniendo un valor 19.57 g SV/L, que se encuentra dentro del rango óptimo para la (DA). Una vez obtenidos los (SV) se realizó un ensayo de actividad metanogénica (AME) para obtener un estimado del metano que se está produciendo; se utilizó como referencia la investigación de Machado et al., (2017).

#### **3.4.1 ACTIVIDAD METANOGÉNICA EN EL INÓCULO**

Para realizar este ensayo se utilizaron botellas de 120 mL de color ámbar, con un volumen útil de 100 mL que contenía porcentajes de: inóculo, agua destilada y acetato de sodio con concentración de 2 g acetato/L que se calcularon a partir de los sólidos volátiles del inóculo.

##### **3.4.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN NECESARIO PARA LA AME**

Para realizar el cálculo de la AME es necesario tener previamente realizado el análisis de sólidos volátiles del inóculo.

$$\text{Sólidos volátiles (SV)} = 19.57 \text{ mg/L}$$

$$\text{Valor AME} = 10 \text{ mg/L}$$

$$\text{Volumen del recipiente} = 100 \text{ mL}$$

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$$19.57 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * V_1 = 10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 100 \text{ mL}$$

$$V_1 = V_i = 52.63 \text{ mL}$$

Blanco

$$V_i = 52.63 \text{ mL} \approx 53 \text{ mL}$$

$$V_A = 47.37 \text{ mL} \approx 47 \text{ mL}$$

$$V_i + V_A = V_s$$

$$53 \text{ mL} + 47 \text{ mL} = 100 \text{ mL}$$

Control

$$V_i = 52.63 \text{ mL} \approx 53 \text{ mL}$$

$$V_A = 46.37 \text{ mL} \approx 46 \text{ mL}$$

$$V_{ac} = 1 \text{ mL}$$

$$V_i + V_A + V_{ac} = V_s$$

$$53 \text{ mL} + 46 \text{ mL} + 1 \text{ mL} = 100 \text{ mL}$$

Se realizaron controles por duplicado para la mezcla de inóculo con acetato de sodio y agua destilada, así también para los blancos que solo contenían inóculo. A estas cuatro muestras se les aireó con nitrógeno al 99.9999% de pureza en el Laboratorio de Nuevos Materiales durante un minuto para eliminar el oxígeno presente. Finalmente se cubrieron las tapas con teflón, silicona y cinta para evitar el escape de gases.

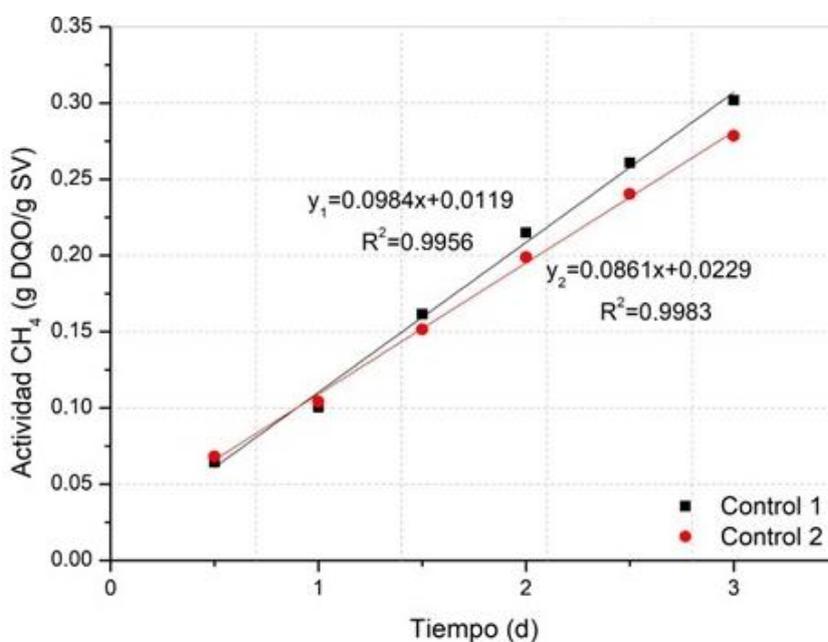
Las muestras se incubaron en una estufa de marca Durocell durante 3 días a una temperatura de 35 °C, la medición se realizó cada 12 horas utilizando la metodología del desplazamiento de líquido en una probeta invertida, para esto se preparó una solución barrera de NaOH 0.01N.

### 3.4.1.2 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN BARRERA

La solución barrera es aquella que adsorberá gases como el  $\text{CO}_2$  pero que se desplazará al tener contacto con el  $\text{CH}_4$ . La solución es una mezcla de 1 g de NaOH con 0.4 g de fenolftaleína aforada en un balón de 1 litro con agua destilada.

Las mediciones diarias dieron volúmenes entre 4 mL y 26 mL de desplazamiento, lo que conlleva a representar una actividad metanogénica sobre acetato de sodio de 0.28 g  $\text{DQOCH}_4/\text{g SV-día}$  (Figura 3.1).

**FIGURA 3.1 GRÁFICA DE PRODUCCIÓN ACUMULADA DE METANO EN EL INÓCULO**



**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DE INÓCULO

En la Tabla 3.3 se detallan las técnicas y métodos utilizados para la caracterización del inóculo.

**TABLA 3.3 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL INÓCULO**

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>	<b>Método</b>
Nitrógeno total	Combustión	PEE/F/01
Zinc	Adsorción atómica	PEE/F/21
pH	-	PEE/F/15
Conductividad eléctrica	-	PEE/F/15
Humedad	Gravimetría	PEE/F/18
Materia orgánica	Gravimetría	PEE/F/09
Alcalinidad	Volumetría	APHA 2320-B
Sólidos volátiles	Gravimetría	APHA 2540-E

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

### **3.6 MODELO EXPERIMENTAL**

#### **3.6.1 DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL**

Para la construcción de los digestores se utilizó la metodología de Astals et al., (2015). En este experimento se usó botellas de volumen de 100 mL de capacidad, con una tapa a la cual se introdujo un capuchón de 3.0 cm de diámetro y 2.5 cm de ancho. En el capuchón se insertó una aguja de 0.012 cm x 3.2 cm y a esta se unió a un tubo de venoclisis de 7.0 cm de largo con una llave de paso en la mitad. En su extremo final se le colocó una llave de tres vías para aumentar el nivel de seguridad para un posible escape de gas y se cubrió con taípe y silicón a las uniones.

El biorreactor armado se conecta a la probeta invertida que consta de dos mangueras. La primera sirve para la nivelación del líquido que reposa dentro de la probeta, la parte inferior de la manguera hace contacto con el exterior y la otra en la parte superior donde reposa el aire interno de la probeta. La segunda manguera se conecta al biorreactor y el otro extremo sobre la superficie interna donde reposa el aire de la probeta.

La probeta invertida se encuentra en un recipiente de 3 litros con 1 litro de la solución barrera de NaCl saturada al 95%, la que permite retener un 99% de metano y 92% de dióxido de carbono (Barrera & Manobanda, 2018).

El dispositivo de control de la temperatura fue armado usando un tubo de ensayo con capuchón, cable doble de cobre, bovina, y un cristal de 7.0 cm x 1.0 cm. Al ensamblar estos materiales y conectarlos a energía eléctrica se produce un incremento en la temperatura del agua en 6.5 °C, por lo que se colocaron 6 dispositivos para obtener 39 °C que es un parámetro indispensable para la producción de biogás.

### 3.6.2 ENSAYO DE POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN

Las pruebas de BPM indican la capacidad que tiene el inóculo junto a diferentes cantidades y concentraciones de sustrato para encontrar la mezcla óptima que garantice mayores cantidades de biogás en el proceso de digestión anaerobia.

**TABLA 3.4 RELACIÓN INÓCULO-SUSTRATO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ZINC**

Etiqueta	Relación I-S (LOD:SUS) (% v/v)	Concentración de Zn en cascarilla de arroz (mg/L)
R10	67:33	10
R30	67:33	30
R50	67:33	50
R70	67:33	70
R100	67:33	100
R150	67:33	150
R0	67:33	0
R-LODO	100:0	0

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

Previamente se obtuvo seis diferentes concentraciones de Zn adsorbidas en la cascarilla de arroz como indica la Tabla 3.4. Para la mezcla en los biorreactores

se usó 20 g de cascarilla de arroz con concentraciones de 10 mg/L, 30 mg/L, 50 mg/L, 70 mg/L, 100 mg/L y 150mg/L de Zn, y se añadió 60 mL de inóculo.

### 3.6.2.1 ACOPLAMIENTO Y PUESTA EM MARCHA DE LOS BIODIGESTORES

La mezcla de inóculo-sustrato ocupó un espacio de 60 mL para no generar una fuerza interna que pueda expulsar el tapón del reactor. Se aireó a los reactores con nitrógeno al 99.9999% durante 1 minuto y se selló.

La relación inóculo-sustrato fue de 3:1 para que el consumo del sustrato sea rápido y no genere acumulación de AGV's ni disminución del pH. Es necesario resaltar que las relaciones idóneas se establecen a valores por debajo del 40% de sustrato dentro de un inóculo (Bautista, 2016).

Las pruebas se realizaron por duplicado, seis biorreactores con concentraciones de zinc y dos blancos. Los datos se tabularon con temperatura, tiempo de incubación y volumen desplazado. Se procesó generando gráficas de dispersión obteniendo la desviación estándar y la media de la producción de biogás. Además, el volumen de solución desplazada por el biogás que fue normalizado mediante la Ley de gases ideales utilizando la Ecuación 3.6.1:

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación 3.6.1}$$

Dónde:

$P$  = Presión absoluta a condiciones normales (atm)

$V$  = Volumen (L)

$n$  = moles de gas

$R$  = Constante universal de los gases ideales (atm\*L/mol\*K)

$T$  = Temperatura absoluta a condiciones normales (K)

Mediante la aplicación de la ecuación de gases ideales se puede calcular en el área de estudio como muestra la Ecuación 3.6.2:

$$P_1 V_1 = nRT_1 \quad \text{Ecuación 3.6.2}$$

Al igualar las constantes de  $n$  y  $R$  se puede obtener la Ecuación 3.6.3 que sirve para normalizar el biogás.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = nR \quad \text{Y} \quad \frac{PV}{T} = nR$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{PV}{T}$$

Despejado  $V$  se obtiene:

$$V = \frac{T}{P} * \frac{P_1 * \frac{V_1(mL)}{1000}}{T_1} \quad \text{Ecuación 3.6.3}$$

Aplicando la Ecuación 3 se presenta un ejemplo de gas normalizado para el volumen de desplazamiento (23.5 mL) inicial de R10.

$$V = \frac{273.15 \text{ K}}{1 \text{ atm}} * \frac{0.72 \text{ atm} * \frac{23.5 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}}}{273 + 39 \text{ K}}$$

$$V = 0.014805 \text{ L}$$

De acuerdo a la normalización se determinó la producción diaria de biogás (mL/día), producción específica diaria y acumulada de biogás (mL/ g SV día).

El análisis estadístico de varianza (ANOVA) fue utilizado para tratar los resultados de la producción específica diaria acumulada de biogás, y realizar una comparación entre medias de cada muestra para determinar si se presentan diferencias estadísticas significativas. Para la comprobación de la posible existencia de las diferencias se aplicó la prueba de Tukey.



**Imagen 1.** Biorreactor con lodo anaerobio

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de la caracterización físico-química de la cascarilla de arroz.

**TABLA 4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

Parámetro	Resultado	Unidad
Humedad	5.9	%
Cenizas	18.2	%
Volátiles	63.5	%
Celulosa	35.2	%
Hemicelulosa	24.7	%
Lignina	20.2	%
Carbón fijo	9.5	%
Nitrógeno total	0.37	g/100g muestra
Alcalinidad	129.6	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Zinc	0.6	%

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

El contenido de humedad fue 5.9%, es cercano al valor reportado por Tipanluisa et al., (2015), con un valor de 6.4%. Estos valores son óptimos para la transformación de la materia orgánica a energía. No necesitan acondicionamiento previo antes de ingresar a los biodigestores debido a que un porcentaje inferior al 30% de humedad es importante para la conversión energética y para el incremento de la velocidad de reacción (Gutiérrez et al., 2018).

El valor de la ceniza de cascarilla de arroz fue 18.2% es cercano a los valores reportados por Llanos (2016) y Vargas (2013) que fueron de 19.5% y de 17.1% respectivamente. Un porcentaje de ceniza inferior al 20% indica la carencia de productos perjudiciales para el crecimiento de bacterias como es el azufre. Además, es un indicador de biodegradabilidad por el contenido de  $\text{SiO}_2$  que es un componente que ocupa 90% del contenido total de sustancias inorgánicas presentes en la cascarilla de arroz y en este caso al contener un porcentaje bajo de cenizas habrá mayor posibilidad de biodegradación (Camargo & Higuera, 2016).

El contenido de material volátil fue de 63.5% similar al reportado por Cabrera et al., (2016) con 65.37%, y Mosquera (2015), con 64.4% por lo tanto son diferencias despreciables. La temperatura de los biorreactores se mantiene constante a 39 °C, pero un incremento puede aumentar considerablemente la pérdida de masa, generando la liberación de compuestos altamente volátiles. Hay que resaltar que los porcentajes elevados de material volátil impiden que los valores de  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$  incrementen por sus altas temperaturas de desvolatilización (Llanos, 2016).

El contenido de lignina fue 20.2%, el proyecto de Capdevilla et al., (2015) obtuvo 19.0% de lignina en la cascarilla de arroz, y 18.0% por parte de Rengifo et al., (2019). El bajo porcentaje de lignina proporciona la oportunidad para aprovechar los azúcares disponibles de la cascarilla de arroz (Capdevilla et al., 2015).

El contenido de celulosa en la cascarilla de arroz fue de 35.2% y hemicelulosa con 24.7%. Lema & Arroyo (2019), afirman que el porcentaje de celulosa puede estar entre 28 y 36% y el de hemicelulosa entre 18.1 – 21.4%. Tipanluisa et al., (2015), indican que el contenido de celulosa también puede variar entre 35 - 40% y hemicelulosa entre 20 - 25%.

Dentro de estos rangos, el contenido de celulosa y hemicelulosa incrementan las probabilidades de ruptura de la estructura cristalina que poseen y permiten el acceso microbiológico y enzimático a los azúcares favoreciendo así un valor agregado al residuo. Además, la celulosa y hemicelulosa son importantes para la

remoción de metales pesados dado que en su composición presenta grupos fenólicos que indican la presencia de grupos carboxílicos ionizables que favorecen a la adsorción de iones metálicos (Proaños, 2014).

El contenido de nitrógeno fue de 0.37 g/100 g. Esta concentración está dentro del rango establecido por algunos autores (0.21 g/100g – 0.38 g/100g). (Mosquera, 2015; Piñas, 2014).

El contenido de nitrógeno sirve para establecer relaciones de oxidación, la cantidad contenida en la cascarilla de arroz se degradará y producirá acumulación de amonio, incrementado su pH en procesos de digestión anaerobia. Además, está relacionada al contenido de humedad, un residuo con menor humedad tendrá menor cantidad de nitrógeno y por ende menos aporte para la transformación a nitrógeno amoniacal que es un inhibidor de bacterias (Ríos, 2017).

El valor de alcalinidad fue de 129.6 mg/L  $\text{CaCO}_3$ . De acuerdo a Higuera (2017), el valor de 165 mg/L  $\text{CaCO}_3$  es normal para la cascarilla de arroz en estado natural. La alcalinidad muestra la presencia de carbonatos y bicarbonatos que afectan la digestión anaerobia, valores inferiores a 200 mg/L  $\text{CaCO}_3$  no presentan influencias sobre este proceso y no producen cambio significativo en el pH durante la degradación (Barrera & Manobanda, 2019).

El contenido de carbón fijo fue de 9.5%, el promedio de carbón fijo en la cascarilla de arroz de tres países diferentes (China, Canadá, Estados Unidos) fue de 16.1%, según Llanos (2016). Además, Cabrera et al., (2016) obtuvieron un porcentaje de 13.1%. El análisis de carbón fijo es útil para identificar la parte de la biomasa que almacena energía química después de liberar los compuestos volátiles, es decir la cantidad de carbón fijo influirá en la energía disponible que tendrán las bacterias (Ríos, 2017).

Finalmente el contenido de zinc en la cascarilla de arroz fue de 0.66%. Morejón (2017), obtuvo 0.006% de zinc y Nova et al., (2014), 0.24%. La variación del

contenido de zinc puede ser consecuencia de la biofortificación del cultivo. La región de la producción, especie, tamaño de la cascarilla, ecotipo y climatología. A más de esto, el bajo pH del suelo del que se extrajo el sustrato está correlacionado con el incremento del contenido del metal en el tejido vegetal. Es decir que el cultivo se desarrolló a condiciones bajas de pH, provocando así la baja solubilidad del zinc en agua permaneciendo en los tejidos de la cascarilla de arroz (Nova et al., 2014).

## 4.2 ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL INÓCULO.

**TABLA 4.2 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL INÓCULO**

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Nitrógeno total	0.18 ± 1.32	%
Zinc	0.14 ± 0.09	%
pH	6.50 ± 0.27	%
Humedad	99.30 ± 0.03	%
Materia orgánica	0.49 ± 1.07	%
Alcalinidad	1100.00 ± 119.76	mg CaCO <sub>3</sub> /L
Sólidos Volátiles	19.57 ± 2.78	APHA 2540-E

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

La concentración de zinc en el inóculo fue 0.14%, los valores encontrados en otras investigaciones son diferentes (entre 0.0035 y 0.02%) porque la alimentación del ganado difiere. La dieta del ganado contiene a menudo productos esenciales para mejorar el crecimiento óptimo con elementos como el zinc por sus propiedades antimicrobianas. Sin embargo, el zinc no es totalmente absorbido y cerca de 95% se excreta tanto en orina animal como en estiércol (Zhu et al., 2018; Trejo, 2013; Camacho, 2016).

El contenido de nitrógeno del inóculo en la presente investigación fue 0.18%, de acuerdo a González (2015), el porcentaje típico de nitrógeno de un lodo biológico está entre 3 y 6% y en un lodo mixto de 1 a 6 %. El factor al cual se le atribuye el

déficit del nitrógeno es que se pierde en forma amoniacal en el sobrenadante mientras transcurre la etapa de maduración (González, 2015).

En este estudio el contenido de sólidos volátiles fue 19.57 g/L y 0.59% de materia orgánica, lo que indica que la cantidad de bacterias en el inóculo es óptima para el consumo de sustrato (Bautista, 2016). Acorde a Castro et al., (2016), valores entre 10 y 20 g/L de SV de un inóculo permitirán que sean convertidos a CH<sub>4</sub> más fácilmente, debido a que los SV tienen una relación directamente proporcional con el potencial biológico para la producción de CH<sub>4</sub>. Bautista (2016), sugiere que el mejor aporte para la estabilización de bacterias en un inóculo es una concentración de sólidos volátiles entre 15 – 20 g/L.

El contenido de humedad fue de 99.30%. De acuerdo a Peñaherrera (2015), este porcentaje de humedad puede generar saturación en los poros de la masa del inóculo, provocando una disminución de microorganismos. Por otro lado, valores inferiores al 60% ayudan a mejorar significativamente el proceso de digestión anaerobia mesófila, ya que permite una rápida circulación de gases, nutrientes y microorganismos (Peñaherrera, 2015).

El pH fue de 6.5, varía constantemente durante el proceso de maduración del inóculo ocasionado generalmente por el crecimiento microbiano. El rango óptimo de pH de acuerdo a Enríquez & Jurado (2016), está entre 6.6 y 7.6, y según Sosa (2015), de 6.0 a 8.3. Los inóculos con valor fuera de estos rangos presentan desequilibrios en la producción y consumo en exceso de ácidos grasos volátiles. La disminución del pH provoca acidificación del lodo y el incremento del pH provoca inhibición por NH<sub>3</sub> (Sosa, 2015).

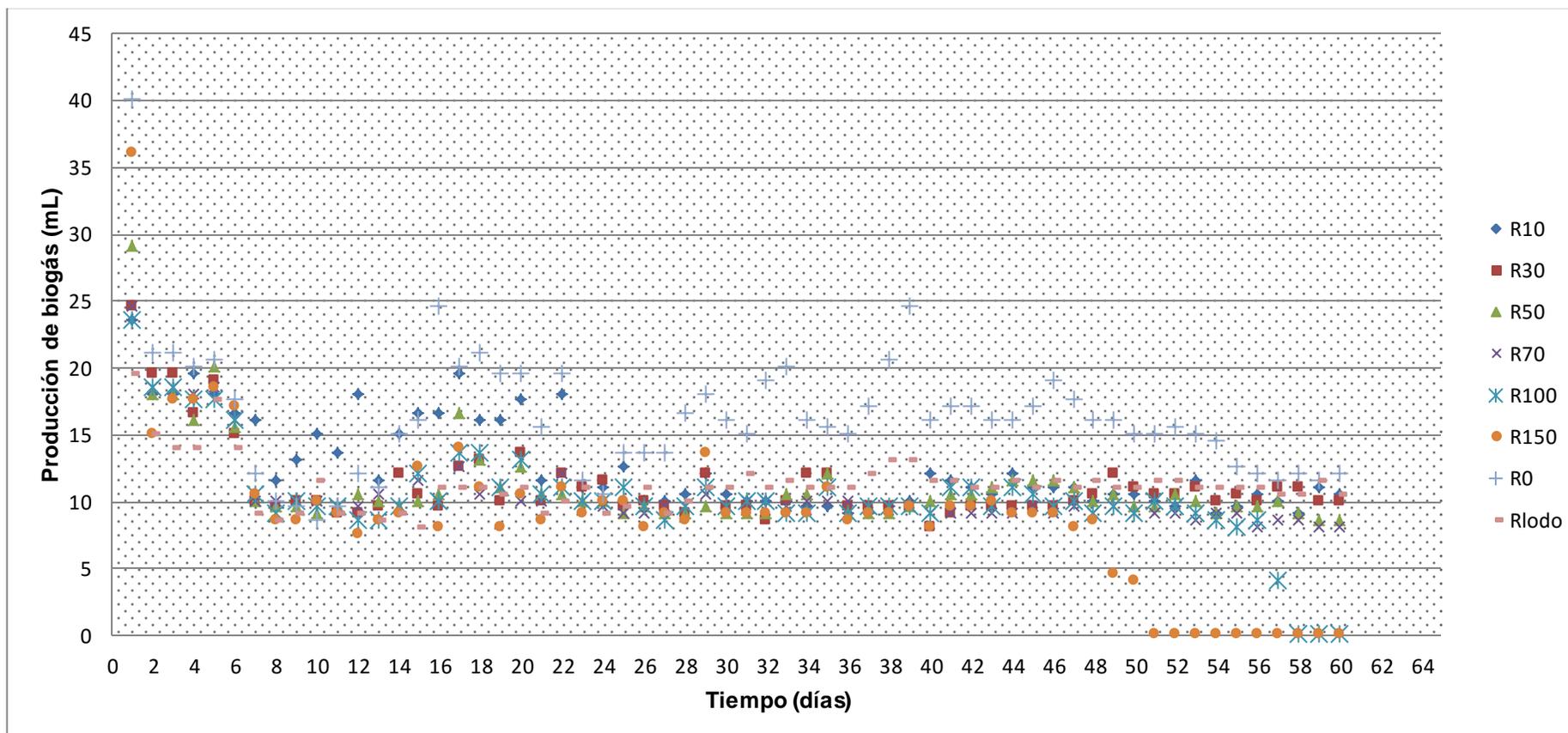
Morales (2018), enuncia que el rango de alcalinidad está entre 1500 a 3000 mg CaCO<sub>3</sub>/L para un correcto desarrollo de las bacterias metanogénicas. El valor de 1100 mg CaCO<sub>3</sub>/L que obtuvo esta investigación tendrá más probabilidades de no resistir a los cambios repentinos de pH. Sin embargo, la actividad microbiana continúa con la transformación de sustancias incrementando la alcalinidad del sistema progresivamente. De esta forma el inóculo no producirá toxicidad y

permitirá controlar los ácidos grasos volátiles, evitando grandes disminuciones de pH y por ende equilibrando la generación de  $\text{CH}_4$  (Escobar, 2018). La intensa alcalinidad puede devastar la actividad microbiana, precipitando carbonatos y creando problemas en el digestor. Lo que provoca la disminución de  $\text{CO}_2$ , que es un aceptor del  $\text{H}_2$  en el proceso redox que genera  $\text{CH}_4$ . Si la concentración de alcalinidad es pequeña se generará una menor cantidad de  $\text{CO}_2$  (Machado et al., 2016).

### **4.3 REGISTRO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

En la Figura 4.1 se indica el registro de volumen de biogás durante 63 días. El registro de datos de cada uno de los biorreactores se encuentra en el Anexo I.

FIGURA 4.1 PRODUCCIÓN DIARIA DE BIOGÁS (mL/día)



ELABORACIÓN: Mendieta, (2020)

En la Figura 4.1 se observa que la primera semana después de la adición de nitrógeno al 99.9999% de pureza los valores de biogás se encuentran entre 14 mL – 22 mL en todos los biorreactores. Son los más altos registrados por R70, R100 y R150 durante la operación, esto se debe a que las bacterias metanogénicas cuentan con un metabolismo en el que producen energía a partir de sustancias que no contienen oxígeno. El papel fundamental del nitrógeno añadido fue desplazar el  $O_2$  al exterior de los biorreactores generando un medio anaerobio indispensable para las bacterias (Corrales et al., 2015).

A partir del día 10 los valores de R10, R30, R50, R70 y R100 empiezan un desarrollo progresivo hasta aproximadamente el día 25 que llegan a su valor máximo 17 mL, 16 mL, 13 mL, 12 mL y 13.5 mL, respectivamente. Esto se debe a un proceso de digestión anaerobia equilibrada, en la que no se han generado productos intermedios y el resultado es una conversión casi completa obteniendo así mayores cantidades de biogás (Arhoun, 2017).

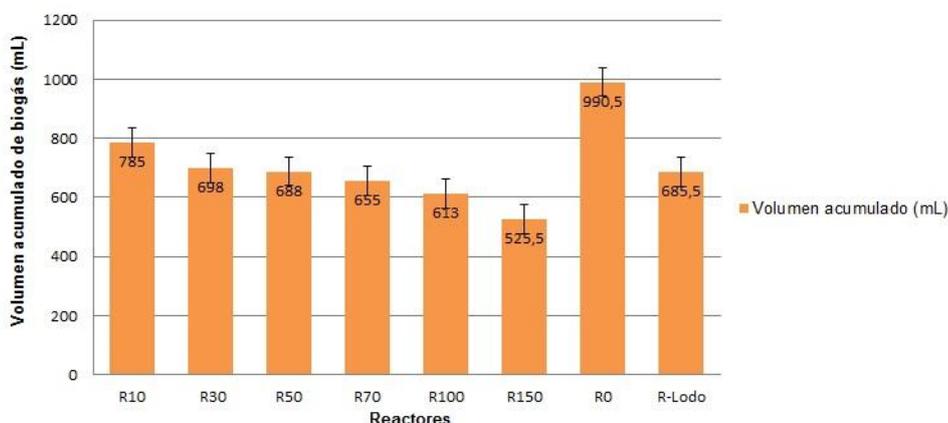
La producción de biogás en la semana 2 y 3 fue superior que en el resto del experimento. Los biorreactores R70, R100 y R150 disminuyeron sus valores después de la primera semana, a partir de ahí se mantuvieron con volúmenes de biogás constantes. Estos resultados muestran que el zinc generó toxicidad en el proceso de digestión anaerobia a partir de la segunda semana.

La cascarilla de arroz es un material de difícil biodegradación debido a su alto contenido de silicio por lo que el volumen de biogás producido es bajo (Camargo & Higuera, 2016). Sin embargo, en el caso del blanco con cascarilla de arroz sin adición de zinc (R0) fue el biorreactor que produjo más biogás (990.5 mL) durante los 63 días de operación. La naturaleza y la composición química de la cascarilla de arroz a más de las cantidades naturales de zinc (0.66% en la estructura de cascarilla de arroz y 0.14% de zinc en el inóculo, Tabla 4.1 y Tabla 4.2.), favorecen la producción de metano, ya que brindan nutrientes y mayor cantidad de fracción orgánica biodegradable para ser transformada en  $CH_4$  (Reyes, 2017). Por otro lado, el blanco (solo inóculo) se mantuvo con una producción entre 10 mL y 15 mL de biogás durante gran parte del experimento.

En la semana 7 se evidenció una disminución de biogás en R100 y R150 con respecto a R10, R30, R50 y R70. En el día 51 se produjo la inhibición de la metanogénesis en R150 y en el día 58 se presentó inhibición en R100. Estos resultados ratifican que la sensibilidad microbiana a la toxicidad del zinc generó perturbaciones que estuvieron correlacionadas con su concentración en el sustrato, donde la mayor concentración de zinc (R150) inhibió la fermentación anaeróbica en el sistema en menor tiempo (Arhoun, 2017). Esto afirma la hipótesis de la presente investigación comparada con el estudio de Asimbaya, (2016) en la cual presentó inhibición de la metanogénesis a 150 mg/L utilizando estiércol porcino y residuos de madera.

Las diferentes concentraciones de zinc adsorbidas en la cascarilla de arroz muestran disminución en la generación de biogás con respecto al blanco que no contiene zinc como se evidencia en la Tabla 4.3. Los reactores R100 y R150 presentaron la menor producción de biogás al tener la mayor concentración de zinc.

**FIGURA 4.2 VOLUMEN ACUMULADO DE BIOGÁS (mL)**



Acorde a la Figura 4.2 los volúmenes acumulados de biogás de R10, R30, R50 y R70 descienden, pese a esto no presentan inhibición después de 63 días de digestión anaeróbica. Esto se debe a que la presencia de zinc en concentraciones superiores a 100 mg/L se vuelve una sustancia tóxica que afectará el crecimiento de las bacterias anaeróbicas y por ende la producción de biogás (Reyes, 2017).

#### 4.4 COMPARACIÓN DE LOS VALORES INICIALES Y FINALES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

En la Tabla 4.3 se detallan los resultados de la caracterización final de los biorreactores.

**TABLA 4.3 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN DESPUÉS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Parámetro	Resultado							Unidad
	R10	R30	R50	R70	R100	R150	R0	
Nitrógeno total	0.27	0.14	0.15	0.15	0.13	0.13	0.16	%
Materia orgánica	3.10	1.25	2.59	1.93	1.63	1.69	3.69	%
Zinc	0.006	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.004	%
pH	6.92	7.17	6.03	7.06	6.22	6.02	7.69	1:1
Humedad	87.45	87.90	84.90	86.19	83.86	86.28	91.17	%

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

El nitrógeno total se mantiene entre los valores 0.13% y 0.27%, no se presenta mayor variación con el valor inicial (0.22%) del lodo anaerobio. Se presenta un porcentaje de consumo de nitrógeno del 46.60% en R50 y R70, R30 con 57.10%, R0 con 37.50% y un valor de 69% en R100 y R150 siendo estos biorreactores los que más consumieron nitrógeno. El consumo de nitrógeno es un proceso usual mediante vía biológica, los microorganismos estimulados por el zinc compiten por el nitrógeno consumiéndolo rápidamente donde hay más concentración de zinc, generalmente alcanzando rendimientos de consumo de hasta 80% siendo utilizado para la formación de nuevas células (Gonzales, 2015).

En promedio se consumió 57.8% de nitrógeno a excepción del R10 que incrementó 23.0%, esto se debe a que en los biorreactores con concentración de 10 ml/L de zinc ingresó una pequeña cantidad de oxígeno que inhibió parte de las bacterias fermentativas que son encargadas de descomponer el nitrógeno,

transformando componentes complejos a formas moleculares más simples como amonio y nitrato. La inhibición en R100 y R150 presentó el mayor consumo de nitrógeno (69.0%) por acción bacteriana por desnitrificación en donde el nitrito se transforma a nitrato; se pudo comprobar debido a que se identificó el olor fuerte y característico al finalizar el experimento (Sosa, 2015). La mayoría de nitrógeno en los procesos de digestión anaerobia se transforman a nitrógeno amoniacal importante nutriente para los microorganismos y, es un factor que puede generar inhibición del proceso metanogénico. Una concentración excesiva (5000 mg/L) puede evitar que se alcance el máximo potencial posible para la generación de biogás (Gutiérrez & Ochoa, 2019).

En el caso del zinc, la inhibición se presentó en R100 y R150 con concentraciones de 100 mg/L y 150 mg/L de zinc. Sin embargo, el estudio de Wang et al., (2018), de digestión anaerobia sin el uso de sustrato que busca efectos inhibitorios a causa de la toxicidad del zinc, encontró que a 400 mg/L de zinc no generó una inhibición, al contrario incremento la producción de biogás. Zhang et al., (2017), encontraron que se producen efectos tóxicos a 7.5 mg/L de zinc en contacto directo con el inóculo y que a 800 mg/L de zinc no genera inhibición sino un incremento en la producción de biogás del 8 – 10% con respecto al blanco que no contiene zinc. Además, obtuvo porcentajes de incremento de acumulación de biogás de 51.2% y 56.0% con concentraciones de 125 mg/L y 1250 mg/L de zinc correspondientemente con respecto al control que no contenía zinc. Esto se debe a que la toxicidad de los metales pesados está relacionada con la concentración iónica libre de metales más que con la concentración total de los mismos, es por esto que incrementan la producción de biogás a concentraciones tan elevadas a diferencia del presente estudio (Zhang et al., 2017).

Después de someterse al proceso de digestión anaerobia los valores de zinc se redujeron de 0.28% a 0.01% en R30 eliminando 96.45% de zinc. En los reactores R50, R70, R100, R150 disminuyó a 0.02% eliminando 92.90% de zinc. Hay que resaltar que R10 redujo a 0.006% el contenido de zinc eliminando un valor del 98.00%. Es decir la disminución de zinc se produce en todos los reactores pero con mayor eficacia cuando se contienen mayores concentraciones. La eliminación

de zinc es posible gracias a la fuerte sorción del metal pesado en la cascarilla de arroz y a la adsorción al medio anaerobio que es consumido rápidamente debido a que es un estimulante para los microorganismos (Zhang et al., 2017).

El valor de pH que se registró al inicio de la digestión anaerobia fue 6.5, valor que favorece a las bacterias anaerobias fermentativas debido a que se desarrolla en rangos de 4.0 - 8.5 (Su, 2014). El valor final de los biorreactores se encontró en el rango de 6.0 – 7.7 el cual está cercano a los valores más favorables para las bacterias metanogénicas que crecen en ambientes de pH de 6.5 a 8.0 (Parra, 2018).

El reactor R0 que posee el valor más alto de pH (7.7) generó la mayor cantidad de biogás por lo que no se genera inhibición, ni un incremento excesivo de nitrógeno en forma amoniacal que inhiba la metanogénesis. Se atribuye a que las bacterias generadoras de ácido propiónico y butírico funcionaron con normalidad (Zhang et al., 2015). El incremento de pH al final del experimento a 7.7 puede asociarse al cambio de la materia orgánica en AGV's (Parra, 2015). Por otro lado el valor mínimo de pH es 6.0 en R150, indica que el metano producido antes de la inhibición no fue de buena calidad. Villanueva et al. (2015), indica que el descenso por debajo de 6.3 ocasionará un déficit de CH<sub>4</sub> con biogás de pocas cualidades energéticas.

El contenido de materia orgánica tuvo valores entre 1.25% en R30 y 3.69% en R0. El mayor valor registrado de materia orgánica está en R0 que no contiene zinc agregado y se observa que a partir de R30 los valores de materia orgánica disminuyen mientras que el valor de concentración de zinc agregado asciende. En la digestión anaerobia la materia orgánica se mineraliza incrementando el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuyendo el nitrógeno orgánico. Esto se debe a la adición de concentraciones de zinc que está enriquecido con más de 300 enzimas las cuales participan en la catálisis de reacciones anaerobias, estimulando el desarrollo de las bacterias metanogénicas y consumiendo rápidamente la materia orgánica que contiene más zinc (Wang et al., 2018).

Parra (2015), afirma que la relación inóculo-sustrato (I-S) produce cambios en la generación de biogás. Acorde a su investigación una relación de 0.25 produce los mejores resultados alrededor de 179.19 mLCH<sub>4</sub>/g SV, mientras que una relación de 9:1 genera un déficit en la producción con valores de 17.56 mLCH<sub>4</sub>/g SV. En el presente trabajo se utilizó una relación I-S de 0.33 produciendo valores que se indican en la Tabla 4.4.

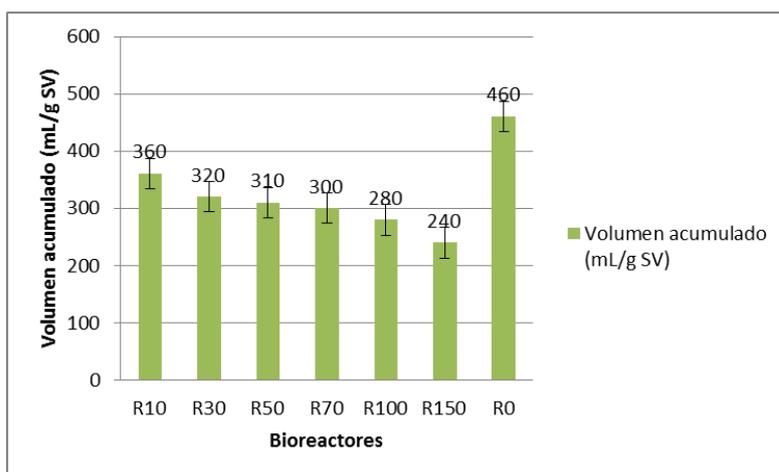
**TABLA 4.4 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

Nº	Volumen (mL/g SV)
R10	360
R30	320
R50	310
R70	300
R100	280
R150	240
R0	460

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

A continuación se muestra la gráfica de barras de la producción acumulada de biogás en mL/g SV.

**FIGURA 4.3 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE BIOGÁS (mL/g SV)**



**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

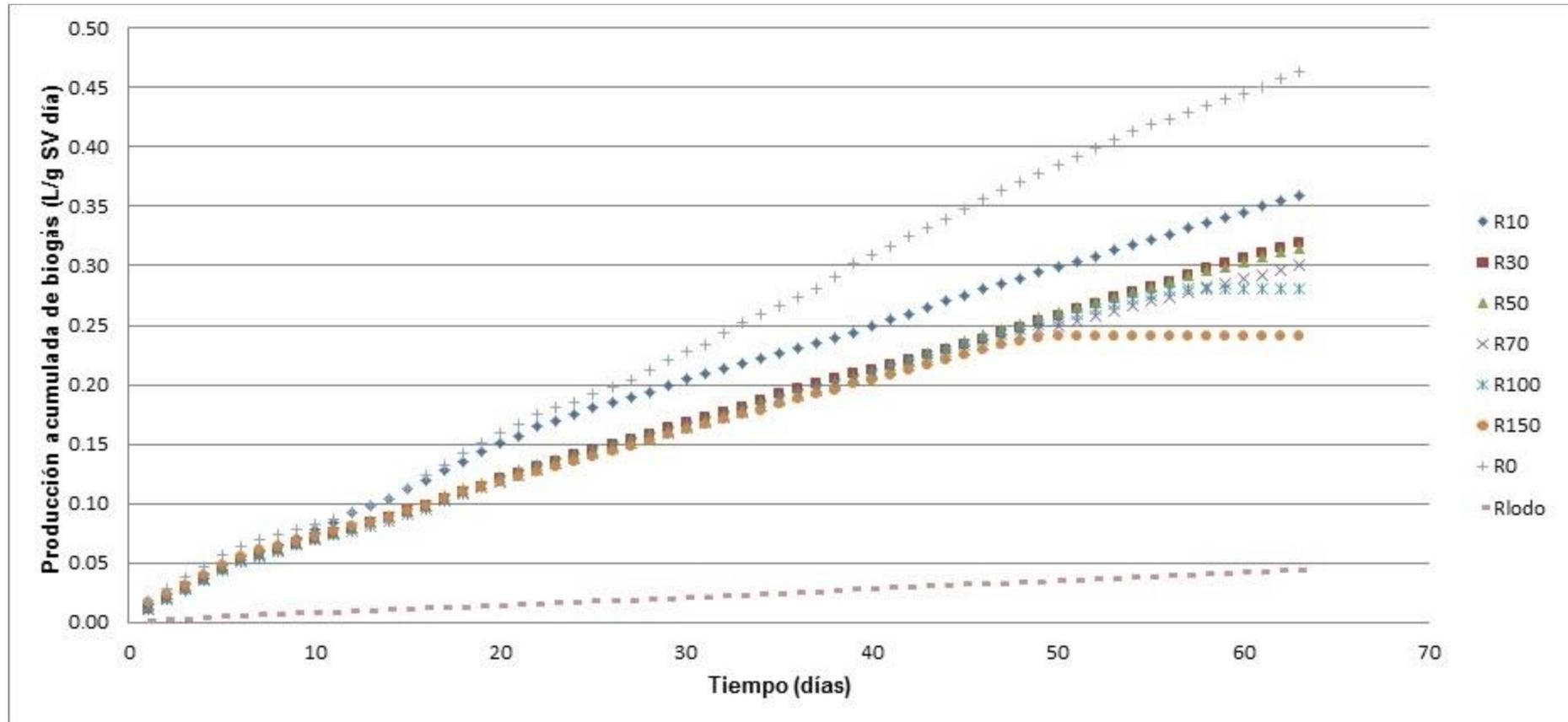
El intervalo de humedad varía entre 83.86% y 91.17% con promedio de 87.51%. El contenido de humedad de 91.17% de R0 fue el mayor registrado y el menor fue

de 83.86% de R100, esto es un indicador que muestra el equilibrio presente entre el sustrato y el inóculo, los valores <60% de humedad son idóneos y facilitan los procesos de digestión anaerobia. Sin embargo, en esta investigación los valores son elevados pudiendo haber provocado un déficit en la producción de biogás por la saturación de poros de la materia orgánica presente en el inóculo, la lenta circulación de gases o microorganismos (Peñaherrera, 2015).

#### **4.5 PRODUCCIÓN ESPECÍFICA ACUMULADA DE BIOGÁS**

Se realizó el cálculo de biogás acumulado con respecto al contenido de sólidos volátiles mediante la normalización del volumen aplicando la Ecuación 3.6.3. Los valores de producción acumulada se encuentran en el Anexo II y las curvas obtenidas se muestran en la Figura 4.4.

FIGURA 4.4 PRODUCCIÓN ACUMULADA DE BIOGÁS (L/g SV)



ELABORACIÓN: Mendieta, (2020)

En la Figura 4.4 se presenta la producción específica acumulada de biogás que varía desde 0.24 L/g SV en R150 con la menor producción de biogás a R10 con 0.36 L/g SV con la mayor producción. El valor máximo del blanco es de 0.46 L/g SV. Se produjeron valores muy similares en R30, R50 y R70 con 0.32 L/g SV, 0.31 L/g SV y 0.30 L/g SV, respectivamente.

La mayor producción de biogás con cascarilla de arroz contaminada con zinc después de 63 días de producción fue de R10 con 0.36 L/g SV o 785 mL acorde a la Tabla 4.4. Garay (2013), produjo un total de 2735 mL de biogás en 32 días de incubación. Gutiérrez & Ochoa (2018), produjeron un valor de 43 mL utilizando estiércol porcino durante 60 días y Rojas (2018) enuncia que la producción normal de biogás con cascarilla de arroz es de 470 mL/día utilizando una masa aproximada a la del presente estudio. Esta diferencia se debe a varios factores como el valor inicial del sustrato que se añadió al inóculo con una masa de 20 g y la capacidad de los biorreactores. El valor inicial de SV y el contenido de 10 mg/L de zinc en la cascarilla de arroz lo que ocasiona un incremento en la toxicidad.

El análisis de varianza (ANOVA) muestra que los datos de los reactores (R10, R30, R50, R70, R100, R150 y R-Lodo) de producción acumulada de biogás comparado entre medias fueron estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ) con un valor de  $p = 0.00$ . Los valores máximos y mínimos de las medias son 0.246 y 0.022 L/g SV. La máxima producción de biogás se presentó en R0 con 0.246 L/g SV seguido de R10 con 0.203 L/g SV. Sin embargo, R150 y R100 que inhibieron la metanogénesis obtuvieron una media de 0.169 L/g SV y 0.160 L/g SV respectivamente (Barrera & Manobanda 2018).

De acuerdo con la prueba de Tukey el blanco R0 y R-Lodo muestra que las medias son estadísticamente diferentes con todos los biorreactores ( $p \leq 0.05$ ). El biorreactor R150 que inhibió la metanogénesis presenta medias diferentes con R10 y R30 y el biorreactor R100 presenta diferencia únicamente con R10. Los valores de  $p$  se detallan en la Tabla 4.5. Y Anexo XIV.

**TABLA 4.5 VALORES DE P ENTRE ENSAYOS (PRUEBA DE TUKEY)**

Diferencia de niveles	Valor de p	Diferencia de niveles	Valor de p
R10-R30	0.082	R50-R100	0.721
R10-R50	0.084	R50-R150	0.323
R10-R70	0.037	R50-R0	0.001
R10-R100	0.037	R50-R-LODO	0.000
R10-R150	0.006	R70-R100	0.999
R10-R0	0.046	R70-R150	0.532
R10-R-LODO	0.000	R70-R0	0.000
R30-R50	0.982	R70-R-LODO	0.000
R30-R70	0.739	R100-R150	0.532
R30-R100	0.740	R100-R0	0.000
R30-R150	0.037	R100-R-LODO	0.000
R30-R0	0.001	R150-R0	0.000
R30-R-LODO	0.000	R150-R-LODO	0.000
R50-R70	0.720	R0-R-LODO	0.000

**ELABORACIÓN:** Mendieta, (2020)

## CAPÍTULO V

### 5.1 CONCLUSIONES

- La evaluación de producción de biogás a partir de cascarilla de arroz con alto contenido de zinc dio a conocer que la concentración de 10 mg/L, 30 mg/L y 50 mg/L de zinc no producen efectos tóxicos en las bacterias metanogénicas, es decir los valores de generación de biogás se mantienen por encima del blanco R-Lodo que solo contiene inóculo.
- La caracterización de la cascarilla de arroz especificó que su composición físico-química fue normal comparada con otros estudios. Los componentes más importantes a verificar son lignina 20.2%, ceniza 18.2% y hemicelulosa 24.7% debido a la difícil degradación que representan. Estos porcentajes obtenidos garantizan la ruptura de la estructura cristalina de la hemicelulosa de la cascarilla de arroz aprovechando la energía disponible para una óptima digestión anaerobia y, también para indicar la carencia de productos perjudiciales para el crecimiento de bacterias como es el azufre.
- La actividad metanogénica del lodo anaerobio en ausencia de sustrato presentó un valor de 0.28 g DQOCH<sub>4</sub>/g SV-día con un desplazamiento de líquido con volúmenes entre 4 mL y 26 mL y un volumen acumulado de 685.5 mL, demostrando así que las bacterias se encuentran en la etapa de desarrollo para consumir materia orgánica rápidamente.
- Mediante la aplicación de la prueba de desplazamiento del líquido se pudo identificar que en el biorreactor R70 con una producción de 655 mL presenta una reducción importante en la producción de biogás con respecto al blanco R-LODO que produjo 685.5 mL.
- Se genera inhibición de la metanogénesis a una concentración de 100 mg/L y 150 mg/L de zinc, descartando que se haya producido inhibición por factores diferentes al zinc como: pH, relación I-S, nitrógeno, sólidos volátiles y materia orgánica.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis de cromatografía de gases para los biorreactores con concentraciones de 10, 30, 50 mg/L, pese a no haber producido menor cantidad de biogás que el blanco R-Lodo el porcentaje de contenido de metano puede ser inferior al normal del biogás.
- Realizar la digestión anaerobia con dispositivos de agitación en los biorreactores buscando mantener en movimiento el contenido durante todo el proceso de la digestión anaerobia para evitar que el sustrato se precipite en el fondo del biorreactor y las bacterias no lo puedan consumir con facilidad.
- Realizar un análisis de toxicidad del líquido resultante (digestato) de la digestión anaerobia de los biorreactores R10, R30, R50 y R70 para verificar si se lo puede utilizar como abono.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J., & Bonilla, J. (2016). *Diseño y construcción de un biodigestor para producción de biogás a partir de estiércol vacuno en la finca Isabel de la parroquia Taracoa, provincia de Orellana* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, Ecuador.
- Acarley, F. (2018). *Evaluación de la producción de metano a partir de las aguas mieles del beneficio húmedo del café mediante digestión anaerobia* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Adekunle, K.F. and Okolie, J.A. (2015) A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(1), 205-212.
- Abadía, R., & Melgarejo, J. (2017). El sector agroalimentario: Sostenibilidad, cooperación y expansión. *Prospectiva*, 15(1), 16-28.
- Arhuon, B. (2017). *Digestión y co-digestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* (Tesis de doctorado). Universidad de Málaga, Málaga, España.
- Asimbaya, C. (2016). *Obtención de materiales compuestos con propiedades magnéticas para la remoción de zinc a partir de residuos lignocelulósicos* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Astals, S., Batstone, J., Tait, S., Jensen, D. (2015). Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, 81(1), 208-215.
- Barrera, G., & Manobanda, M. (2018). *Estudio del potencial energético de residuos procedentes de la industria avícola a partir de digestión anaerobia* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Bautista, V. (2016). *Evaluación de la generación de biogás a partir de excretas porcinas en la granja agroinporc y diseño de un biodigestor* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Baweja, M., Baredar, P., Lal, R. (2018). Parametric evaluation of digestión process a review. *Science PC*, 6(1), 1-4.
- Bonetta, S., Bonetta, S., Ferretti, E., Fezia, G., Gilli, G., Carraro, E. (2014). Agricultural reuse of the digestate from anaerobic co-digestion of organic waste: Microbiological contamination, metal hazards and fertilizing performance. *Water Air Soil Pollut*, 225(2046), 1-11.

- Borrás, C. (30 de julio de 2018). ¿Qué es la eutrofización?. Ecología verde. De <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-eutrofizacion-34.html>.
- Cabrera, D., Camacho, O., Salvador, M., Taco, S. (2016). Adsorción del colorante anaranjado 2 GL sobre sílice activa elaborada a partir de cascarilla de arroz. *Ciencia e Ingeniería*, 37(3), 1-10.
- Camacho, R., Villada, H., Hoyos, J. (2016). Evaluación del estiércol de vaca como inóculo en la digestión anaerobia termófila de residuos sólidos urbanos. *Información Tecnológica*, 28(3), 29-36.
- Camara, M. (2018). *Determinación de residuos de metales tóxicos en arroz mediante ICP-MS*. Universidad de Jaén, España.
- Camargo, N., & Higuera, C. (2016). Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz. *Ciencia e Ingeniería*, 27(1), 91-109.
- Capdevilla, V., Kafarov, V., Gely, C., Pagano, A. (2015). Simulación del proceso fermentativo para la obtención de bioetanol a partir de residuos de arroz. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 6(2), 11-21.
- Castro, L., Escalante, H., Gómez, O., Jiménez, D. (2016). Analysis of methanogenic from slaughterhouse wastewater using anaerobic digestion. *Dyna*, 83(199), 1-10.
- Centeno, S., & Rodríguez, B. (2018). *Evaluación del uso de los residuos de cascarilla de arroz como agregado en bloques para la construcción* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Manabí, Ecuador.
- Corporación Financiera Nacional (CFN), (2018). La política agropecuaria ecuatoriana. \_De\_ <http://www.competencias.gob.ec/wpcontent/uploads/2017/06/01PPP2016.pdf>.
- Chávez, A., & Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia & Virtualidad*, 9(2), 1-18.
- Corrales, L., Antolínez, D., Bohórquez, J., Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(23), 55-81.
- Corredor, Y. & Pérez, L. 2018. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59-72

- Delgado, D., & Cabrera, C. (2017). *Evaluación del simbiote azolla caroliniana-anabaena azollae sobre la agroproductividad del cultivo de arroz y las propiedades químicas del suelo* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Feliz López, Ecuador.
- Doria, G., Valencia, G., Hormaza, A., Gallego, D. (2016). Estudio preliminar de la cascarilla de arroz modificada y su efecto en la adsorción de Cr IV en solución. *Producción + Limpia*, 11(1), 103-116.
- Escobar, M. (2018). *Ensayo biochemical methane potencial de digestión anaerobia con fangos mixtos de EDAR y residuos orgánicos de vertedero*. Universidad de Sevilla. España.
- Enríquez, A., & Jurado, M. (2016). Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia). *Revista Unimar*, 34(1), 243-259.
- Garay, R., Cornejo, E., Medina, M. (2013). *Producción de biogás a nivel de laboratorio, utilizando estiércol de ganado vacuno y residuos agroindustriales (torta de piñón, cascarilla de arroz y rumen de ganado vacuno)*. Instituto Nacional de Innovación Agraria, San Martín, Perú.
- González, I. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de edar*. Universidad de Córdoba, España.
- Gutiérrez, A., Bustillos, L., Hernani. (2018) Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol. *Revista estudiantil AGRO-VET*, 2(2), 1-7.
- Gutiérrez, L., & Ochoa, L. (2018). *Determinación del potencial energético para la producción de biogás, a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas*. Universidad de Santo Tomás. Bogotá, Colombia.
- Higuera, S. (2017). Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC – Yopal, Casanare, Colombia. *Revista de Investigación Agraria Ambiental*, 8(1), 107-120.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, INEC (2016). Encuesta de superficie y producción agropecuaria. Ecuador en cifras.gob.ec. Ecuador. 1-64.
- Lema, S., José, J., Silva, C. (2019). *Obtención de nanocelulosa a partir de la cascarilla de arroz mediante hidrólisis ácida* (Tesis de doctorado). Universidad de Guayaquil, Ecuador.

- Llanos, O. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación ambiental. *Producción + limpia*, 11(2), 153-156.
- Nova, J., Pimentel, A., Adames, A., Contreras, F., Pujols, A., Jiménez, F., & Mella, J. (2014). Hierro y zinc en el suelo y su expresión en el grano de arroz. *Revista Agropecuaria Forestal APF*, 3(1), 39-46.
- Machado, W. D., Marquetti, F., Molina, F., Gusils, C., Quaia, A. (2017). Caracterización de lodos como inoculantes para un reactor anaeróbico para el tratamiento de vinaza. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 93(2), 13-17.
- Ministerio de electricidad y energía renovable (MEER). (2015). Proyectos de bioenergía en el ecuador. De <http://meer.gob.ec>.
- Morales, P. (2018). *Evaluación experimental del potencial de producción de biogás a partir de aguas residuales procedentes del camal metropolitano de quito* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Mosquera, M. (2016). *Análisis termogravimétrico de la cascarilla de arroz, para la estimación del modelo cinético del proceso de gasificación y pirolisis* (Tesis de pregrado). Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.
- Morejón, S. (2017). *Obtención de grafeno a partir de cascarilla de arroz ecuatoriana* (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica del Litoral. Guayas, Ecuador.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2018). FAOSTAT. De <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA/visualize>
- Ortiz, C. (2018). *Análisis de la cascarilla de arroz utilizada como material para filtros de tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de jeans "Multiprocesos Gallegos"* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Tungurahua, Ecuador.
- Palau, E., & Virginia, C. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 1-15.
- Peñaherrera, M. (2015). *Estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante digestión anaerobia* (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Quito, Ecuador.

- Piñas, J. (2014). Evaluación del potencial de generación energética con cáscara de arroz en la zona del Huallaga Central del departamento de San Martín. *Moyobamba: Editorial of the Regional Direction of Energy and Mines San Martín*.
- Proaños, J., & Castro, Y. (2014). Evaluación de la producción de ácido láctico a partir de cascarilla de arroz por *Lactobacillus delbrueckii*. *Revista Mutis*, 4(1), 33-39.
- Rengifo, C., Yanguas, C., Gaviria, I., Velásquez, I. (2018). *Evaluación del uso de la cascarilla del arroz para el diseño de un proceso industrial* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Rojas, C. (2018). *Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la piladora La Merced S.L.R* (Tesis de pregrado). Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú.
- Reyes, E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (24), 60-81.
- Ríos, I. (2017). *Producción de pellets de cascarilla de arroz con máximo contenido energético* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Ripley, E., Boyle, C., Converse, C. (2014). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *Water Pollution Control Federation*, 58(5), 406-4511.
- Sáez, A., Urdaneta, G., Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 1-16.
- Salinas, G. (2019). *Cascarilla de arroz aplicada en el desarrollo de productos de diseño industrial* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Sherwinca. (2 de junio de 2015). Protección techos de galvanizado. SherwinCA. De <https://sherwinca.wordpress.com/2015/06/02/aprenda-como-proteccion-de-techos-galvanizado-y-aluminio/>.
- Sierra, C., & Acevedo, R. (2013). Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustibles de segunda generación. *Ingenium*, 1(28), 1-10.

- Sosa, M. (2015). *Parámetros de control y monitoreo del proceso en digestores anaerobios de pequeña escala y diferentes tecnologías* (Tesis de doctorado). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.
- Su, H., Pan, C., Ying, G., Zhao, J., Zhou, L., Liu, Y., He, L., (2014). Contamination profiles of antibiotic resistance genes in the sediments at a catchment scale. *Sci Total Environ*, 490, 708–714.
- Tejada, C., Villanoba, A., Garcés, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecnológicas*, 18(34), 1-12.
- Tipanluisa, L., Celi, S., Moreno, G., Molina, J. (2015). Estudio experimental de la combustión de la cascarilla de arroz en una cámara de lecho fijo. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, 11.
- Trejo, I., Salazar, E., López, J. & Vázquez, C. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(5), 727-738.
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega, J., Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1), 1-16.
- Villanueva, J., Nájera, H., Gómez, J., Hernández, T., Velasco, A. (2015). Generación, caracterización y uso del biogás. Producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. *Lacandonia*, 5(2), 1-10.
- Wang, H., Yuanhua, D., Yunya Y., Gurpal, S., Zhang, X. (2013). Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China. *Journal of Environmental Sciences*, 25(12), 2435-2442.
- Yao, D., Zhang, X., Wang, G., Chen, T., Wang, J., Yue, Z., Wang, Y. (2017) A novel parameter for evaluating the influence of iron oxide on the methanogenic process. *Biochemical Engineering Journal*, 125(1), 144-150.
- Zhang, T., Yang, Y., Pruden, A., 2015. Effect of temperature on removal of antibiotic resistance genes by anaerobic digestion of activated sludge revealed by metagenomic approach. *Appl. Microbiol Biotechnol*, 99 (18), 7771–7779.
- Zhang, R., Wang, X., Gu, J., Zhang, Y. (2017). Influence of zinc on biogas production and antibiotic resistance gene profiles during anaerobic digestion of swine manure, *Bioresource Technology*, 244(1), 63-70.

Zhu, X., Angelidaki, I. Kougias, P., Treu, L. (2018). Deciphering the microbial ecology in bio- gas reactors for optimizing the anaerobic digestion proces. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark (DTU). Dinamarca.