



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de lixiviado de  
relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas**

**JARAMILLO GUANOLIQUE ANGEL PAUL  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de  
lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas**

**JARAMILLO GUANOLIQUE ANGEL PAUL  
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de  
lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas**

**JARAMILLO GUANOLIQUE ANGEL PAUL  
INGENIERO AMBIENTAL**

**GUERRERO AZANZA MARIUXI YAMILET**

**MACHALA  
2023**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA

Facultad de Ingeniería Civil

Carrera de Ingeniería Ambiental

Tema:

Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas

Autor:

Angel Paul Jaramillo Guanolique

Título a obtener

Ingeniero Ambiental

Docente Tutor

Ing. Mariuxi Yamilet Guerrero Azanza, Mgs.

Docente Cotutor

Dr. Hugo Ítalo Romero Bonilla, PhD.

2023

# TESIS

---

## INFORME DE ORIGINALIDAD

---

4%

INDICE DE SIMILITUD

4%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

---

## FUENTES PRIMARIAS

---

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	<1 %
2	<a href="http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe">revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
3	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
4	<a href="http://patents.google.com">patents.google.com</a> Fuente de Internet	<1 %
5	<a href="http://pdffox.com">pdffox.com</a> Fuente de Internet	<1 %
6	<a href="http://repositorio.cepal.org">repositorio.cepal.org</a> Fuente de Internet	<1 %
7	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
8	<a href="http://aprenderly.com">aprenderly.com</a> Fuente de Internet	<1 %
9	<a href="http://rraae.cedia.edu.ec">rraae.cedia.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %

---

10	<a href="http://www.engormix.com">www.engormix.com</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://alponente.com">alponente.com</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://biotic1.blogspot.com">biotic1.blogspot.com</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://iucn.org">iucn.org</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://prezi.com">prezi.com</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://www.buenastareas.com">www.buenastareas.com</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://www.portalfruticola.com">www.portalfruticola.com</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://www.universia.net.co">www.universia.net.co</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://c4ir.co">c4ir.co</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://gk.city">gk.city</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://www.colibri.udelar.edu.uy">www.colibri.udelar.edu.uy</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://www.hisour.com">www.hisour.com</a> Fuente de Internet	<1 %

22 [www.planetseed.com](http://www.planetseed.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

23 Miguel Casallas-Ojeda, Sully Meneses-Bejarano, Ronald Urueña-Argote, Luis Fernando Marmolejo-Rebellón, Patricia Torres-Lozada. "Techniques for Quantifying Methane Production Potential in the Anaerobic Digestion Process", Waste and Biomass Valorization, 2021 <1 %  
Publicación

---

24 [chapingo.orex.es](http://chapingo.orex.es) <1 %  
Fuente de Internet

---

25 [examplum.com](http://examplum.com) <1 %  
Fuente de Internet

---

26 [www.climaterra.org](http://www.climaterra.org) <1 %  
Fuente de Internet

---

27 [www.muyinteresante.es](http://www.muyinteresante.es) <1 %  
Fuente de Internet

---

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

El que suscribe, JARAMILLO GUANOLIQUE ANGEL PAUL, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



---

JARAMILLO GUANOLIQUE ANGEL PAUL

0706985496





UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA

Facultad de Ingeniería Civil

Carrera de Ingeniería Ambiental

Tema:

Evaluación de metano mediante la codigestión anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas

Autor:

Angel Paul Jaramillo Guanolique

Título a obtener

Ingeniero Ambiental

Docente Tutor

Ing. Mariuxi Yamilet Guerrero Azanza, Mgs.

Docente Cotutor

Dr. Hugo Ítalo Romero Bonilla, PhD.

2023

---

---

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad Técnica De Machala ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar mi tesis a Dios, por proveerme sabiduría, salud y guía en cada paso de mis estudios académicos.

A mis queridos padres, Angel Belisario Jaramillo Soto y Karina Elizabeth Guanoliقة Pereira, por su apoyo incondicional, su amor y por creer en mí siempre. Esta tesis es un reflejo de los valores que me inculcaron y de la confianza que depositaron en mis capacidades.

A mi amada esposa Julissa Fernanda Torres Jaramillo, por su paciencia, comprensión y apoyo durante todo este proceso y mi querido hijo, Santhiel Julian Jaramillo Torres, por su alegría y por ser la luz que ilumina mi camino. Esta tesis es un homenaje a su inocencia y a la esperanza que representan para el futuro.

A mi estimada tutora, Mariuxi Yamilet Guerrero Azanza, y estimado cotutor, Hugo Romero Bonilla, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Gracias por compartirme sus conocimientos y por ayudarme a convertir mis ideas en realidad. Esta tesis es un reflejo de su invaluable apoyo y mentoría.

Finalmente, a la Universidad Técnica de Machala, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y por ofrecerme los recursos necesarios para realizar esta investigación. Esta tesis es un homenaje a su compromiso con la educación y el conocimiento.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por su infinita bondad y por guiarme a lo largo de este camino. Gracias por darme la fuerza, la sabiduría y la perseverancia para completar este proyecto.

A mis padres, Angel Belisario Soto Jaramillo y Karina Guanoliقة Elizabeth Pereira, por su apoyo incondicional y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.

A mi pareja, Julissa Fernanda Torres Jaramillo, por su amor, paciencia y comprensión. Gracias por ser mi compañera de vida y por animarme a seguir adelante en los momentos difíciles.

A mi hijo, Santhiel Julian Jaramillo Torres, por ser mi fuerza para seguir creciendo como profesional para un futuro mejor.

A mis compañeros de laboratorio de “Aplicaciones Electroanalíticas y Bionergía”, por su colaboración y por compartir conmigo su conocimiento y experiencia.

Finalmente, a mi tutora, Mariuxi Yamilet Guerrero Azanza, y cotutor, Hugo Romero Bonilla, por guiarme paso a paso el desarrollo de mi proyecto de tesis, así como la enseñanza académica desde su experiencia profesional.

---

**TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN.....	13
ABSTRACT .....	14
I. INTRODUCCIÓN .....	15
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
A. Antecedentes .....	16
III. JUSTIFICACIÓN.....	17
IV. OBJETIVOS .....	18
A. Objetivo general .....	18
B. Objetivos específicos.....	18
V. HIPÓTESIS .....	19
VI. MARCO TEÓRICO.....	20
A. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	20
1. Sostenibilidad ambiental.....	21
B. Relleno sanitario.....	21
1. Residuos sólidos urbanos (RSU) .....	22
2. Lixiviado de relleno sanitario .....	22
C. Digestión Anaerobia (DA) .....	23
1. Fermentación oscura y Fotofermentación .....	24
2. Proceso de digestión anaerobia.....	24
a. Hidrólisis .....	25
b. Acidogénesis .....	25
c. Acetogénesis.....	25
d. Metanogénesis.....	26
3. Bacterias Metanogénicas .....	27
D. Factores que influyen en la Digestión Anaerobia .....	27
1. Potencial de Hidrógeno (pH).....	27

---

2.	Temperatura.....	28
3.	Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S) .....	28
4.	Ácidos Grasos Volátiles (AGV) .....	29
5.	Solidos Volátiles (SV) .....	29
6.	Amonio (NH <sub>4</sub> ) .....	29
E.	Biogás.....	30
1.	Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	30
2.	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	31
3.	Amoniacó (NH <sub>3</sub> ).....	31
4.	Hidrogeno (H <sub>2</sub> ) .....	31
F.	Lodos de aguas residuales urbanas.....	32
G.	Biodigestor .....	32
H.	Cromatografía de gases .....	32
I.	Gases de efecto invernadero (GEI) .....	33
J.	Bioenergía .....	33
K.	Energías Renovables .....	34
VII.	METODOLOGIA.....	35
A.	Recolección de la muestra.....	35
B.	Caracterización fisicoquímica .....	36
1.	Lixiviado de relleno sanitario .....	36
a.	pH.....	36
b.	Ácidos Grasos Volátiles .....	37
c.	Solidos Disueltos Totales (SDT).....	37
d.	Carbono Orgánico Total (COT) .....	38
e.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	38
f.	Temperatura (°C) .....	38
2.	Lodos de aguas residuales urbanas .....	38

---

a.	Humedad .....	38
b.	Materia orgánica.....	39
c.	Potencia del Hidrógeno (pH).....	39
d.	Temperatura (°C).....	40
C.	Porcentaje de mezcla de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas en los biorreactores .....	40
D.	Cromatografía de gases .....	40
E.	Evaluación estadística de los resultados.....	41
VIII.	RESULTADOS .....	42
A.	Análisis físico-químico de los sustratos residuales .....	42
B.	Pureza de metano mediante cromatografía de gases.....	42
C.	Análisis estadísticos entre la pureza de metano y los tratamientos aplicados a los biorreactores.....	45
IX.	DISCUSIÓN .....	47
X.	CONCLUSIONES.....	48
XI.	RECOMENDACIONES .....	49
	REFERENCIAS .....	50
	ANEXOS.....	55

---

## LISTA DE TABLAS

TABLA I METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE [20] .....	20
TABLA II COMPOSICIÓN APROXIMADA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS [15] .....	22
TABLA III CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO [24].....	23
TABLA IV COORDENADAS DE LA TOMA DE MUESTRA .....	36
TABLA V RELACIÓN VOLUMÉTRICA DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO Y LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS .....	40
TABLA VI RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO Y LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS.....	42
TABLA VII ANOVA DE CH <sub>4</sub> (%) .....	45



---

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Triángulo de Nijkamp [22]. .....	21
Fig. 2. Esquema del proceso biotecnológico de la digestión anaerobia [32]. .....	27
Fig. 3. Síntesis de Energías Renovables o Alternativas [54].....	34
Fig. 4. Mapa de ubicación de la toma de muestra de lixiviado de relleno sanitario .....	35
Fig. 5. Mapa de ubicación de la toma de muestra de lodos de aguas residuales urbanas .....	36
Fig. 6. Pureza de CH <sub>4</sub> (%) en R1 en función de los días de digestión.....	42
Fig. 7. Pureza de CH <sub>4</sub> (%) en R2 en función de los días de digestión.....	43
Fig. 8. Pureza de CH <sub>4</sub> (%) en R3 en función de los días de digestión.....	44
Fig. 9. Efecto de los tratamientos aplicados en términos de pureza de CH <sub>4</sub> obtenido durante los 20 días de experimentación. ....	45

---

**TABLA DE ECUACIONES**

$AGV \left( \frac{mep}{L} \right) = \frac{Y \text{ mL} * 0.1 \frac{meq}{mL} * 1000}{\text{Volumen de muestra (mL)}}$	( 1 ).....	37
$\text{Acidez total} \left( \frac{mep}{L} \right) = \frac{X \text{ mL} * 0.1 \frac{meq}{mL} * 1000}{\text{Volumen de muestra (mL)}}$	( 2 ).....	37
$H\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$	( 3 ).....	39
$MO\% = \frac{\text{peso inicial (105°C)} - \text{peso final (360°)}}{\text{peso inicial (105°)}} \times 100$	( 4 ).....	39

---

**LISTA DE ANEXOS**

<i>Anexo A. Biorreactores anaerobios (R1, R2, R3) .....</i>	<i>55</i>
<i>Anexo B. Recolección de lodos de aguas residuales urbanas en el estero "El Macho" .....</i>	<i>55</i>
<i>Anexo C. Toma de muestra lixiviado de relleno sanitario "Ceibales".....</i>	<i>56</i>
<i>Anexo D. Caracterización fisicoquímica de lixiviado de relleno sanitario en el laboratorio de "Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía" de la UTMACH .....</i>	<i>56</i>
<i>Anexo E. Caracterización fisicoquímica de lodos de aguas residuales urbanas en el laboratorio de "Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía" de la UTMACH. ....</i>	<i>57</i>
<i>Anexo F. Inyección de la muestra de biogás en el cromatógrafo de gases. ....</i>	<i>58</i>
<i>Anexo G. Medición de la pureza de CH<sub>4</sub> en el cromatógrafo de gases .....</i>	<i>58</i>

---

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>AGV</b>	Ácidos Grasos Volátiles
<b>BPM</b>	Bacterias Productoras de Metano
<b>CG</b>	Cromatografía de Gases
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>DA</b>	Digestión Anaerobia
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>pH</b>	Potencial de Hidrógeno
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
<b>RSM</b>	Residuos Sólidos Municipales
<b>RSU</b>	Residuos Sólidos Urbanos
<b>SDT</b>	Sólidos Disueltos Totales
<b>SRB</b>	Bacterias Sulfato Reductoras
<b>ST</b>	Sólidos Totales
<b>SV</b>	Sólidos Volátiles

---

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la producción de metano mediante codigestión anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas. Se diseñaron tres biorreactores anaerobios (R1, R2, R3), con capacidad de 1000 mL, que constaron con tratamientos de 12,5, 25, 50 % v/v de lodos de aguas residuales urbanas para un volumen de trabajo de 900 mL de mezcla. La cuantificación de pureza de metano (CH<sub>4</sub>) en porcentaje se analizó a través del equipo electroquímico cromatógrafo de gases FULI 9790 II durante los 20 días de digestión anaerobia. Según los resultados obtenidos, la composición media de CH<sub>4</sub> comprendía entre un 18,19%, 18,55% y 17,86% para los diferentes tratamientos aplicados (R1, R2, R3), indicando que el tratamiento R2 es el que mejor rendimiento obtuvo durante todo el proceso de operación, manteniendo constante un porcentaje promedio de 18,55 % CH<sub>4</sub> en el tiempo de codigestión anaerobia para esa relación lodo/lixiviado (25%/75% v/v).

***Palabras clave*** — Bioenergía, codigestión anaerobia, metano, biogás, biorreactor.

### ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate methane production by anaerobic co-digestion of landfill leachate and urban wastewater sludge. Three anaerobic bioreactors (R1, R2, R3), with 1000 mL capacity, were designed, consisting of 12.5, 25, 50 % v/v treatments of urban sewage sludge for a working volume of 900 mL of mixture. The quantification of methane (CH<sub>4</sub>) purity in percentage was analyzed through the gas chromatograph electrochemical equipment FULI 9790 II during the 20 days of anaerobic digestion. According to the results obtained, the average CH<sub>4</sub> composition ranged between 18.19%, 18.55% and 17.86% for the different treatments applied (R1, R2, R3), indicating that the R2 treatment is the one that obtained the best performance during the whole operation process, maintaining a constant average percentage of 18.55% CH<sub>4</sub> during the anaerobic co-digestion time for that sludge/leachate ratio (25%/75% v/v).

***Keywords*** — Bioenergy, anaerobic co-digestion, methane, biogas, bioreactor.

---

## I. INTRODUCCIÓN

En la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible busca: “Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” [1]. El cambio climático representa una alteración significativa para la humanidad que se encuentra intrínsecamente correlacionado con el crecimiento demográfico y la dependencia de fuentes energéticas derivadas de combustibles fósiles [2].

Una manera sustentable de generar bioenergía es transformar estos residuos en biogás o biocombustibles, en vez de incinerarlos o depositarlos en un relleno sanitario [3]. Investigaciones de laboratorio han justificado que la codigestión anaerobia es una tecnología alternativa en la recuperación residuos orgánicos locales, a partir de una gestión sostenible [4].

La tecnología de digestión anaeróbica integra la gestión sostenible de residuos orgánicos con la producción de energía renovable (biogás). Este biogás renovable puede ser utilizado como sustituto de los combustibles fósiles en diversas aplicaciones, como la generación de electricidad y calor, que contribuye a la mitigación del cambio climático y gases de efecto invernadero. Además, al mejorar su contenido de metano por encima del 90% mediante la eliminación del dióxido de carbono, el biogás se vuelve apto para sustituir el gas fósil, como el gas natural, en aplicaciones como redes de gas y transporte [5].

Debido al aumento de la población a nivel global, la generación de residuos municipales y domésticos está experimentando un crecimiento significativo. Se estima que la cantidad anual de todos los residuos generados en el mundo oscila entre 7 y 9 mil millones de toneladas, y dentro de esta cifra, más de 2 mil millones de toneladas corresponden a residuos sólidos municipales (RSM). Se proyecta que la producción de RSU alcance los 3.400 millones de toneladas para el año 2050 [6].

El método de gestión de residuos sólidos más utilizado es el relleno sanitario. Este método se caracteriza por su fácil operación y su potencial para producir energía [7]. Los residuos sólidos urbanos (RSU) depositados en los rellenos sanitarios experimentan un proceso natural de descomposición que produce un líquido denominado lixiviado.

La mayor cantidad de volumen de lixiviado ocurre en época de lluvia, donde impacta sobre los residuos o desechos depositados en las celdas, arrastrando consigo contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y patógenos. Estos contaminantes pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales, mismas que pueden afectar negativamente la salud humana y el ambiente [8].

---

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### A. Antecedentes

El metano ( $\text{CH}_4$ ) es un potente gas que, junto al  $\text{CO}_2$ , tiene un impacto significativo en el calentamiento global y se estima que es el responsable de un aumento de  $0,6^\circ\text{C}$  en la temperatura global desde la época preindustrial [9]. Se ha establecido que el  $\text{CH}_4$  atmosférico medio, actualmente tiene una concentración que supera los 1900 partes por billón (ppb), equivalente ( $>2,5$ ) veces mayor que el promedio preindustrial [10]. Estos gases tienen la capacidad de atrapar el calor en la atmósfera, lo que produce un aumento en la temperatura global, que afecta tanto a la atmósfera como a los océanos, ocasionando una serie de transformaciones geográficas, incluyendo la fusión de los casquetes polares, elevación del nivel del mar, así como diversos eventos catastróficos de origen natural [11].

El crecimiento urbanístico y la densidad de población generan un mayor volumen de aguas residuales en áreas reducidas. Su baja cobertura del sistema de alcantarillado público en las ciudades, específicamente en zonas urbanas marginales, ocasiona una mayor demanda de gestión de biosólidos, que es uno de los trascendentales desafíos de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas [12]. Estos residuos contienen una alta carga orgánica que pueden liberar metano, debido a su descomposición de forma anaerobia.

Por otro lado, el elevado costo de inversión de una planta de tratamiento de lixiviados y la reducida asignación presupuestaria del gobierno central a los GAD's municipales provoca un manejo inadecuado de los lixiviados de rellenos sanitarios municipales, ocasionando la contaminación de los recursos suelo, agua superficial y subterránea, como la degradación del componente biótico y la afectación en la salud humana [13].

Se estima que durante la descomposición de los RSU se generan  $0,2 \text{ m}^3$  de lixiviado por cada tonelada de residuos [14]. El cantón Machala se producen alrededor de 322,32 Tn de Residuos Sólidos Urbanos diarios [15] es decir, por cada tonelada de basura se calcula que se genera un volumen de  $64,46 \text{ m}^3$  de lixiviado.



### III. JUSTIFICACIÓN

En la Conferencia de las Partes (COP 26) de la ONU en referencia al Cambio Climático, se llevó a cabo en Glasgow en 2021, 105 países representan el 45% de las emisiones mundiales de metano, los firmantes del acuerdo se comprometieron a una disminución del 30% de emisiones de gas metano para el año 2030, tomando como referencia los índices de CH<sub>4</sub> del año 2020 [16]. En Ecuador, las fuentes de energía renovable constituyen aproximadamente un 8,64 % a la producción total de energía, mientras que el 91,36 % restante proviene de fuentes no renovables. Es importante señalar que este último porcentaje abarca incluso la energía hidroeléctrica, que ha dejado de considerarse como fuente renovable debido a sus impactos en los ríos y áreas montañosas [15].

En la actualidad, preexiste una creciente preocupación por los graves problemas ambientales, como la contaminación de los componentes bióticos y abióticos debido a las actividades productivas. El crecimiento demográfico genera desafíos crecientes en la gestión o administración de los RSU, especialmente con lo que respecta a su disposición final. Los tratamientos de los lixiviados de relleno sanitario son muy costosos y requieren de constante mantenimiento, generalmente estos lixiviados son almacenados en un área denominada “piscina de lixiviado”, generando una amplia remoción de cobertura vegetal para la construcción de nuevas piscinas de lixiviado en función del tiempo.

La codigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos (RSU) con aguas residuales o lodos ha demostrado mediante estudios científicos, ser una tecnología eficaz en la obtención de biogás, producto de la carga orgánica o concentración residual. Este proceso mejora la degradación de cada sustrato individual, lo que resulta en efectos sinérgicos que mejoran la producción de metano y la remoción de DQO [17].

En ese contexto, es importante implementar enfoques sostenibles para la gestión de los lixiviados de rellenos sanitarios, promoviendo equilibrio ecológico y la sostenibilidad de estos residuos sólidos y líquidos; la generación de beneficios económicos y energéticos a partir de los mismos. Además, esta acción se encuentra relacionado con los ODS 5, 7, 8, 9 y 13 de las Naciones Unidas [18], especialmente los ODS 7 y 13, relacionados con la digestión anaerobia de sustratos orgánicos, por ejemplo, la producción de energías renovables, el crecimiento sostenible de la agricultura y la lucha frente a la desertificación y el cambio climático [19].

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Evaluar la producción de metano mediante codigestión anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas como un proceso alternativo de reducción en las emisiones de gases efecto de invernadero.

### *B. Objetivos específicos*

- Caracterizar fisicoquímicamente el lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas.
- Ajustar biorreactores con varias concentraciones de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas para optimizar la producción de metano en términos de pureza.
- Cuantificar la pureza de metano obtenido en las concentraciones mediante cromatografía de gases.
- Evaluar estadísticamente la correlación entre la pureza de metano en porcentaje y los tratamientos aplicados a los biorreactores.

## **V. HIPÓTESIS**

Es posible optimizar la producción de metano proveniente de la codigestión anaerobia de lixiviados de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas mediante diversas concentraciones de los mismos.

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*

En el año 2015, la totalidad de los países integrantes de la ONU acogieron un conjunto de metas conocido como los ODS [20], mismos que representan un plan de acción ambicioso para cimentar un futuro más próspero y sustentable para las comunidades y el ambiente. Estos objetivos se concentran en tres pilares fundamentales: resguardar el planeta, mitigar la pobreza, y; garantizar la seguridad y paz. Para cumplir estos objetivos fundamentales, se han establecido 17 objetivos, 169 metas y 263 indicadores [21].

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un conjunto de 17 metas interconectadas que buscan mejorar cumplir con sus programas y/o proyectos, independientemente de su riqueza o pobreza. Estos objetivos representan un llamado universal a la acción política para ejecutar proyectos o programas de desarrollo sostenible de los países. Según ONU gestiona el desarrollo de los países hacia el logro de los ODS [20].

TABLA I  
METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE [20].

N°	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	Descripción
1	Fin de la pobreza	Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todas partes
2	Hambre Cero	Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible
3	Salud y Bienestar	Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades
4	Educación de calidad	Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos.
5	Igualdad de género	Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y niñas
6	Agua limpia y saneamiento	Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.
7	Energía asequible y no contaminante	Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos
8	Trabajo decente y crecimiento económico	Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.
9	Industria, innovación e infraestructura	Construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.
10	Reducción de las desigualdades	Reducir la desigualdad dentro y entre los países
11	Ciudades y comunidades sostenibles	Hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles
12	Producción y consumo responsables	Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles
13	Acción por el clima	Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos
14	Vida submarina	Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible.
15	Vida de ecosistemas terrestres	Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de forma sostenible los bosques, combatir la

		desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.
16	Paz, justicia e instituciones sólidas	Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, brindar acceso a la justicia para todos y construir instituciones efectivas, responsables e inclusivas en todos los niveles.
17	Alianzas para lograr los objetivos	Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Global para el Desarrollo Sostenible

### 1. *Sostenibilidad ambiental*

La sostenibilidad ambiental se logra al asegurar que su exploración y explotación de recursos naturales no exceda su capacidad de renovación y crecimiento natural de los mismos. Esto implica planificar cuidadosamente cómo se aprovechan estos recursos y evaluar de manera precisa los impactos que dicha explotación tendrá en el ecosistema en su conjunto [22].

En el ámbito de la bioenergía, dos marcos de referencia internacionalmente reconocidos han sido desarrollados para evaluar la sostenibilidad de los sistemas: los indicadores de la Global Bioenergy Partnership (GBEP) y la Norma ISO 13065 sobre criterios de sostenibilidad para la bioenergía, no obstante a pesar de su reconocimiento internacional, aún no se implementan de forma amplia y su aplicación no se encuentra explícitamente vinculada a los ODS [20].

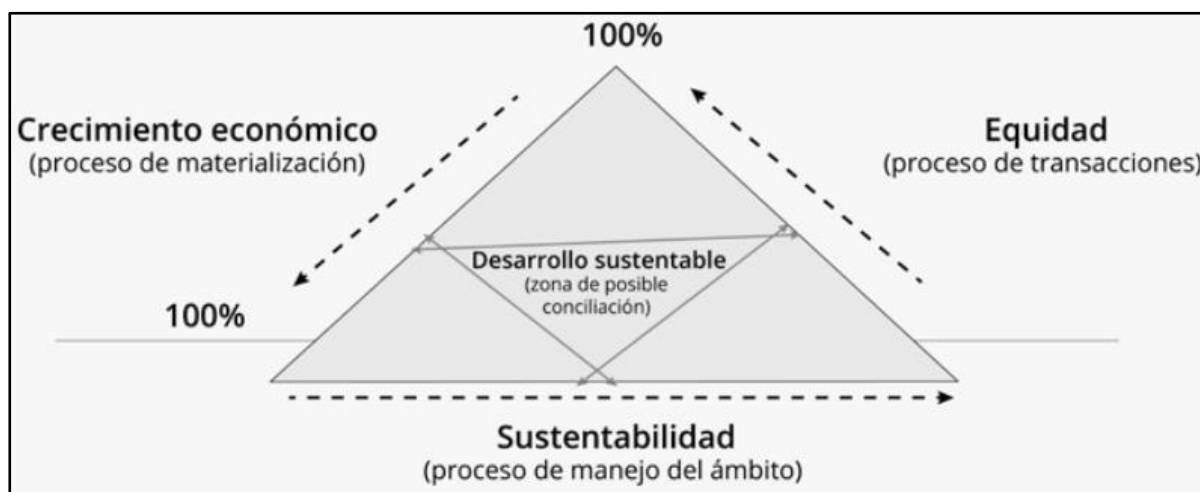


Fig. 1. Triángulo de Nijkamp [22].

### B. *Relleno sanitario*

Un relleno sanitario es básicamente un espacio recubierto en su base para que los desechos y otros tipos de basura queden confinados en capas, lo que aumenta su solidez y estabilidad. En estos rellenos, los residuos son aislados del entorno, convirtiéndolos en seguros después de un proceso completo de descomposición biológica, química y física para evitar que el gas  $\text{CH}_4$  se emita a la atmósfera y así prevenir olores desagradables. Además, las capas superiores son compactadas con una cobertura de tierra de alrededor de 60 a 90 centímetros y

una cobertura de vegetación, permitiendo que estas áreas puedan recuperarse y utilizarse para otros propósitos [23].

La reciente pandemia de coronavirus (COVID-19) ha producido un alto impacto en la cantidad de desechos infecciosos, lo que está sobrecargando la capacidad de los rellenos sanitarios. Esta situación crítica puede tener graves consecuencias ambientales a largo plazo, como agotamiento del espacio, descargas y liberación de efluentes, toxicidad del lixiviado y características infecciosas [24].

### **1. Residuos sólidos urbanos (RSU)**

Los RSU abarcan una mezcla de residuos provenientes de viviendas, mercados, áreas de esparcimiento, limpieza de calles, así como residuos de instituciones como hospitales, además de los residuos industriales y comerciales. La gestión de estos desechos en entornos urbanos implica su eliminación, recolección, recuperación de recursos, reciclaje y tratamiento, con objetivo de promover la calidad del entorno y la salud pública. Al mismo tiempo, busca respaldar la eficacia y productividad económica, creando oportunidades de empleo y generando ingresos [18].

TABLA II  
COMPOSICIÓN APROXIMADA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS [15].

Categoría de residuos	Composición (%)
<b>Alimento</b>	62
<b>Papel y cartón</b>	9
<b>Plásticos de humedad</b>	3
<b>Metal</b>	2
<b>Vaso</b>	3
<b>Desechos del jardín</b>	-
<b>Recortes de césped, fertilizantes</b>	-
<b>Restos de construcción, incluidos el caucho</b>	12
<b>Residuos de madera</b>	-

### **2. Lixiviado de relleno sanitario**

El término lixiviado de un relleno sanitario se describe como el flujo de agua que surge como resultado de la infiltración o percolación de agua lluvia a través de los residuos depositados en las celdas, los procesos bioquímicos de residuos y el contenido de humedad natural presente en dichos residuos. El lixiviado que se origina en una celda de residuos contiene una combinación de compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados (como As, Hg, Pb), presenta una composición variada y un desagradable olor que pueden tener impactos ambientales a largo plazo, como por ejemplo la eutrofización [25]. Los microorganismos

presentes en el lixiviado ejercen un rol esencial en la descomposición acelerada de la materia sólida [26].

El lixiviado se categoriza en distintas fases, que comprenden el lixiviado joven (con menos de 5 años de edad), lixiviado en fase intermedio (con edades comprendidas entre 5 y 10 años), y lixiviado maduro (con más de 10 años de antigüedad) [27]. A continuación, en la TABLA III se muestra los tipos de lixiviados de rellenos sanitarios con sus correspondientes edades y parámetros promedios.

TABLA III  
CARACTERIZACIÓN DE LOS TIPOS DE LIXIVIADOS DE RELLENO SANITARIO [24].

Parámetro	Unidad	Tipo de lixiviado de relleno sanitario		
		Joven (0 a 5 años)	Intermedio (5 a 10 años)	Maduro (10 a 20 años)
<b>DQO</b>	mg/L	>10.000	4000-10 000	<4000
<b>Periodo</b>		Transición	Fermentación de metano	Maduración final
<b>DBO</b>	mg/L	0,5–1,0	0,1–0,5	<0,1
<b>pH</b>		<6.5	6,5–7,5	>7.5
<b>Compuestos orgánicos</b>	%	80 AGV	5–30 AGV+AHF	Alta fracción fúlvica
<b>NH<sub>3</sub>-N</b>	mg/L	<400	N/A	>400
<b>Metales pesados</b>	mg/L	Bajo a medio	Bajo	Bajo
<b>Biodegradabilidad</b>		Importante	Medio	Bajo
<b>Estabilidad</b>		Inestable	Moderadamente estable	estable
<b>Fase</b>		Acidogénico	Metanogénico	Estabilización/metanogénico
<b>Aspecto de color</b>		Amarillo claro	Amarillo claro	verde negro oscuro

### C. Digestión Anaerobia (DA)

La DA consiste en un tratamiento biotecnológico efectivo para la transformación de energía de los sustratos residuales orgánicos sólidos, transformándola CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, que son digeridos por los microorganismos que operan en condiciones anóxicas por mecanismos oxidativos, logrando obtener un rol crucial para la mitigación en las emisiones GEI. Esta tecnología tiene la capacidad de reemplazar el uso de combustibles fósiles por fuentes de energía renovables [28]. La digestión anaeróbica genera un subproducto de gran valor conocido como digestato. Este material se caracteriza por ser estabilizado, inodoro y rico en nutrientes, lo que sirve como uso de fertilizante o acondicionador del suelo en el ámbito agronómico, considerando su alto contenido de macronutrientes vegetales, incluido el N, P, K y S, así como diversos micronutrientes y materia orgánica [29].

El método al que se hace referencia es la DA, un proceso biotecnológico ampliamente utilizado para la reducción de biomasa y el tratamiento de una variedad de materiales orgánicos, tales como lodos de depuradora, residuos sólidos urbanos, estiércol y biomasa lignocelulósica.

Además, permite obtener metano como fuente de energía a bajo costo [24]. La DA se posiciona como la alternativa más prominente para el tratamiento de lodos debido a su eficacia en la estabilización y reutilización de estos materiales [26]. De igual manera, ofrece un conjunto de beneficios ambientales relevantes que la posicionan como una alternativa sostenible en la sostenibilidad de biorresiduos, cuidado de patógenos, la evitación de la acidificación y putrefacción de la biomasa; la disminución de la contaminación y el control de los GEI mediante la estabilidad y gestión de los residuos de biomasa [24].

La digestión anaeróbica (DA) se ha convertido en el proceso de tratamiento de elección dentro de las PTAR por su eficacia de reducir aún más los niveles de contaminantes, producir un lodo bastante estabilizado, reducir sustancialmente el tonelaje de lodo que necesita eliminación, el uso de un mínimo de energía de entrada y la producción de biogás. La DA se aplica principalmente al tratamiento de lodos primarios y lodos secundarios [12].

### ***1. Fermentación oscura y Fotofermentación***

Este proceso involucra la actividad de bacterias anaeróbicas que utilizan carbohidratos complejos como fuente de alimento, generando hidrógeno y acumulando ácidos orgánicos en condiciones anóxicas y oscuras [30].

La fermentación oscura en comparación con la fotofermentación presenta ventajas tales como más fácil de realizar y controlar, no necesita luz, mayor rendimiento y tasa de producción, estabilidad y viabilidad para la industrialización, utilizando una amplia variedad de fuentes de carbono y menores costos operativos. El proceso al que se hace referencia, una técnica biotecnológica innovadora que permite la producción simultánea de bioetanol y biohidrógeno a partir de diversos sustratos [31].

En la fotofermentación, implica la actividad de bacterias fotosintéticas que emplean la luz como su fuente energética, y, al hacerlo, consumen azúcares reductores y ácidos orgánicos para obtener gas hidrógeno [30].

En la fermentación oscura, el biogás producido es una mezcla de gases en la que el hidrógeno y el dióxido de carbono son los componentes principales y el metano también puede producirse [31].

### ***2. Proceso de digestión anaerobia***

En el proceso biotecnológico, los consorcios microbianos que operan en condiciones estrictamente anaeróbicas descomponen los componentes orgánicos presentes en los lodos húmedos de entrada para producir sólidos estables, conocidos como biosólidos, y biogás [12].

Los microorganismos responsables de la degradación en las diferentes etapas de la digestión anaeróbica presentan una amplia diversidad en cuanto a su fisiología, requerimientos



nutricionales, cinética de crecimiento y sensibilidad al medio ambiente. Entre los grupos más relevantes se encuentran los microorganismos productores de ácido y los microorganismos productores de metano [29]. En el proceso de DA se utilizan diferentes desechos, incluida la parte orgánica de los desechos sólidos urbanos, los desechos industriales, las aguas residuales del procesamiento manufacturero y los desechos agrícolas producidos por la producción ganadera y agrícola [18]. El proceso de la DA incluyen las siguientes fases:

#### **a. Hidrólisis**

La hidrólisis es la etapa inicial de la digestión anaeróbica (DA) donde biomoléculas complejas (carbohidratos, proteínas y lípidos) se descomponen en compuestos solubles en agua mediante degradación a través de *Bacteroides*, *Clostridia* y *Bifidobacterias* y, a veces *Streptococos* y *Enterobacteriaceae*. Este proceso es relativamente lento y puede ser un factor limitante en la velocidad de la digestión general, especialmente cuando se utiliza material sólido como sustrato. La celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) se hidroliza para generar glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ). Esta reacción es catalizada por ácidos, tanto homogéneos como heterogéneos, que producen el monosacárido fermentable ( $C_6H_{12}O_6$ ). Los productos de la hidrólisis ( $C_6H_{12}O_6$  y  $H_2$ ) son utilizados por diferentes grupos de microorganismos fermentativos en la siguiente fase para formar compuestos orgánicos de cadena superior, como los ácidos grasos volátiles [18].

#### **b. Acidogénesis**

Esta es la segunda fase, conocida como etapa de fermentación, donde predominan las bacterias acidogénicas *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Sarcina*, *Desulfovibrio* y otras. Estas bacterias convierten los productos de la hidrólisis (azúcares, aminoácidos y lípidos) en una variedad de compuestos como ácidos grasos volátiles, ácidos orgánicos, dióxido de carbono y gas. Su principal ácido orgánico más importante producido en esta etapa es el ácido acético ( $CH_3COOH$ ), que actúa como sustrato fundamental para los microorganismos metanogénicos. Es importante destacar que la obtención de AGV, incluyendo el ácido acético, se ve favorecida cuando el pH del proceso se mantiene por encima de 5, en contraste, la producción de etanol ( $CH_3CH_2OH$ ) se ve favorecida por un pH inferior a 5, si el pH cae por debajo de 4, las reacciones fermentativas se detienen por completo [18].

#### **c. Acetogénesis**

En esta etapa, las reacciones son reversibles con liberación de hidrógeno. Los ácidos grasos volátiles, específicamente el ácido acético y ácido butírico, se convierten en gas  $CO_2$ ,  $H_2$  y  $C_2H_3O_2R$ . Las bacterias activas en esta etapa son *Clostridium*, *Syntrophomonas wolfeii* y *Syntrophomonas wolinii*. La conversión de ácidos grasos volátiles (AGV) en  $CH_4$  y  $CO_2$  durante la metanogénesis es posible gracias a la presencia de moléculas de agua como

---

fuelle de electrones. Alrededor del 70% del metano generado en la DA proviene de la reducci3n del ion acetato en la etapa de metanog3nesis, as3 mismo es un factor determinante en la cantidad de biog3s que se produce. El acetato juega un papel fundamental como producto intermediario primario de esta fase y representa el 25% de los productos formados juntos, con aproximadamente el 11% de hidr3geno [18].

#### ***d. Metanog3nesis***

En esa fase final de la DA, el 3cido ac3tico se convierte en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por bacterias metan3genas, que son anaerobias lo que significa que requieren un ambiente completamente libre de ox3geno para sobrevivir. Adem3s, presenta dos mecanismos adicionales para producir m3s metano, como la reacci3n del CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> y la descarboxilaci3n del etanol.

En esta etapa existen dos tipos de bacterias metanog3nicas: la metanog3nica acet3fila (con las especies activas *Methanosarcina* y *Methanosaeta*) y la metanog3nica hidrogen3fila (con *Methanospirilum*, *Methanobacteriumformicicum*, *Methanoplanus* y *Methanobrevibacterium* como especie dominante). El primero es responsable de la descarboxilaci3n del acetato a metano y el segundo de la formaci3n de metano mediante una reacci3n de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. El resultado final del proceso de digesti3n anaer3bica es el biog3s, que est3 compuesto de metano CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> [18].

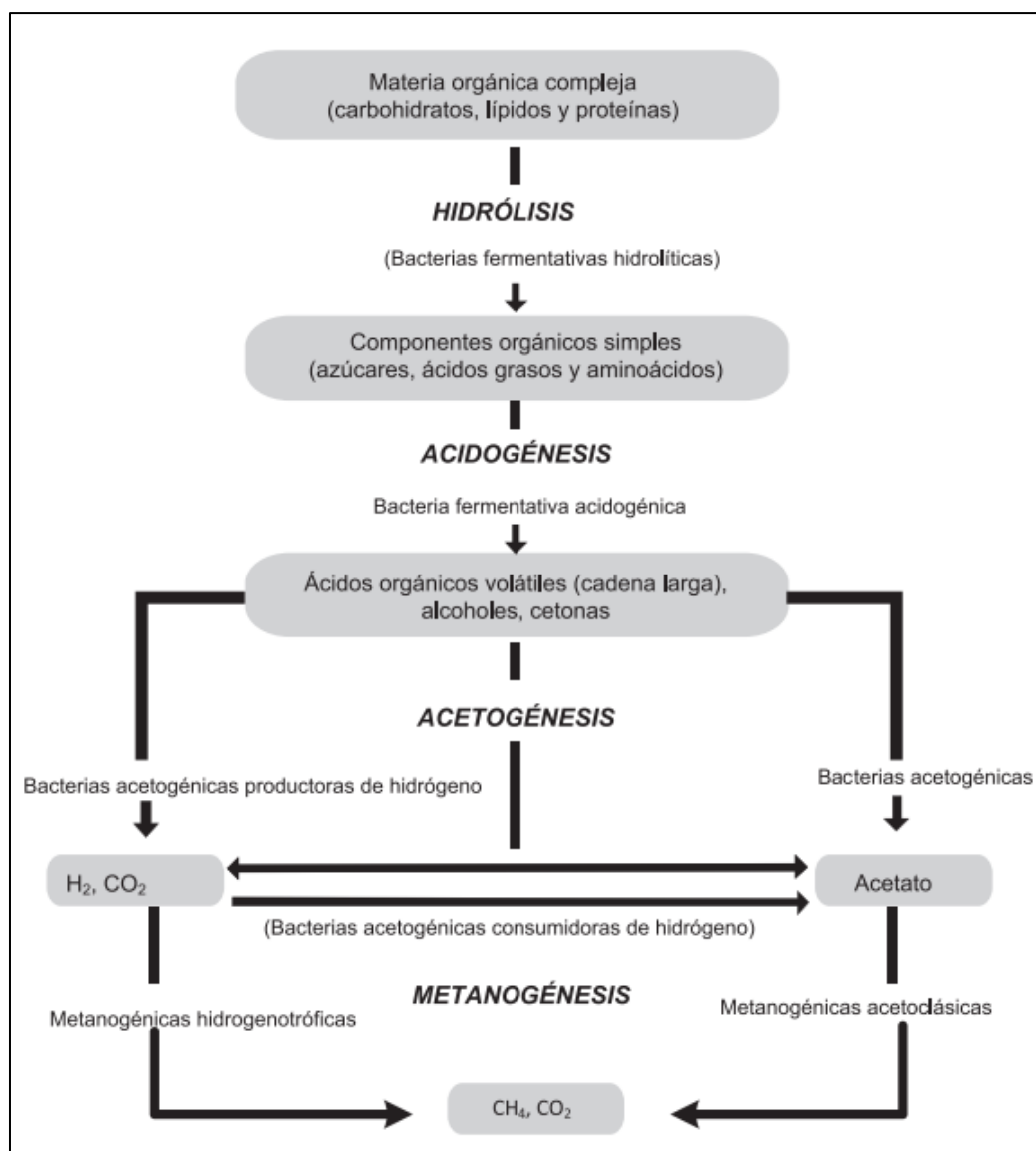


Fig. 2. Esquema del proceso biotecnológico de la digestión anaerobia [32].

### 3. Bacterias Metanogénicas

Las arqueas metanógenas son microorganismos procariotas responsables de la producción de metano. Hay dos categorías de metanógenos: los acetotróficos, que transforman el acetato en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , como las bacterias hidrogenotróficas metanogénicas, que utilizan el hidrógeno para producir metano. A pesar de que todos los metanógenos pueden convertir el hidrógeno en metano, solo ciertas especies tienen la capacidad de convertir el acetato en metano. Algunos ejemplos de metanógenos acetotróficos incluyen *Methanosarcina barkeri*, *Methanospirillum*, *Methanoplanus*, *Methanosarcina* y *Methanosaeta* [33].

#### D. Factores que influyen en la Digestión Anaerobia

##### 1. Potencial de Hidrógeno (pH)

En un sistema de digestión anaeróbica, el pH sigue fluctuando a medida que los microorganismos descomponen los sustratos y otros parámetros del proceso, como la

temperatura, el tipo de materia prima y su composición, influyen en esta variación del pH [34]. Niveles bajos de pH pueden generar sustancias perjudiciales o nocivos como el amoníaco. Entre las primeras tres etapas, los microorganismos prosperan en un rango de pH entre 4 y 8,5, sin embargo, la fase metanogénica exige un pH específico entre 6,5 y 7,2. Si bien la medición del pH proporciona información crucial para el monitoreo de la digestión anaeróbica, no se considera un indicador temprano de desequilibrios en el proceso, sin embargo, se recomienda mantener un pH estable mediante uso de soluciones tampón como NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub> cuando sea necesario [29].

El crecimiento óptimo de los microorganismos, en el control del pH, también se logran reducciones en la toxicidad, generalmente debido a una mayor concentración de amoníaco libre. De manera similar, el pH afecta significativamente la composición de ácidos grasos volátiles (AGV) [18].

## **2. Temperatura**

En general, los microorganismos y consorcios bacterianos que participan en la digestión anaeróbica sólo funcionan de forma óptima a determinadas temperaturas. Por este motivo, es importante que la temperatura de digestor se mantenga estable y que no se produzcan variaciones bruscas de temperatura durante el proceso de fermentación. Las temperaturas de funcionamiento de una planta de biogás pueden ser diferentes [29].

La temperatura desempeña un papel crucial en la digestión anaeróbica (DA), y se pueden identificar tres categorías de DA en función de la temperatura: psicrófila (menos de 25 °C), mesófila (entre 25 y 40 °C) y termófila (más de 45 °C). La mayoría de los biorreactores operan a temperaturas que oscilan entre los 25 y 40 °C, dado que la DA no funciona de manera eficiente a temperaturas bajas. La DA termófila ofrece varias ventajas, como tasas de eliminación de materia orgánica más altas, tasas de crecimiento específicas aumentadas y una mayor producción de biogás [35]. Si la temperatura baja o aumenta durante el proceso de DA, la producción de CH<sub>4</sub> puede detenerse [29].

## **3. Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S)**

Durante la digestión anaeróbica el H<sub>2</sub>S es principalmente el resultado de la reducción del sulfato. Las bacterias sulfato reductoras (SRB) emplean diferentes sustancias, como el hidrógeno, el ácido propiónico, el ácido butírico y el ácido acético, para convertir el sulfato en sulfuro de hidrógeno. La influencia negativa del H<sub>2</sub>S en la digestión anaeróbica se manifiesta de dos maneras: en primer lugar, Las bacterias sulfato reductores y las bacterias productoras de metano se disputan el acceso a las mismas fuentes de carbono y electrones; en segundo lugar, el H<sub>2</sub>S actúa como un tóxico para los metanógenos, limitando su actividad [35].

#### **4. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)**

Los AGV son compuestos carboxílicos alifáticos con cadenas cortas que contienen desde dos (2) a seis (6) átomos de carbono. Estos productos intermedios se generan durante la digestión anaerobia, un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, donde diversos microorganismos trabajan en conjunto para descomponer la materia orgánica presente en diferentes materiales, originando biogás como resultado [36].

Los AGV son compuestos esenciales que se forman en las fases de acidogénesis y acetogénesis durante las etapas de la digestión anaeróbica de materiales orgánicos, la producción de AGV a partir de residuos puede lograrse mediante las dos primeras etapas, es decir, hidrólisis seguida de acidogénesis [37]. Niveles elevados de AGV pueden interrumpir la producción de biogás debido a que aumentan la acidez en el digestor [38]. Aproximadamente el 99,9% de los AGV se encuentran en forma disuelta a un pH de 8,0, mientras que alrededor del 90% están en forma disuelta a un pH de 6,0 [39].

La concentración de AGV se expresa como la concentración de ácido acético en el volumen de material ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) e influyen en algunos factores como la cantidad y calidad del material cargado en el digestor y del equilibrio entre los microorganismos formadoras de ácido y los microorganismos metanogénicos. La concentración de AGV y la relación ácido acético/ácido propiónico son parámetros importantes para evaluar la eficiencia y la estabilidad del proceso de DA [29].

#### **5. Sólidos Volátiles (SV)**

El sólido volátil es un parámetro útil para evaluar fracciones sólidas o semisólidas de materiales biodegradables. Es esencial analizar, cuantificar y monitorear la humedad (MC), los sólidos volátiles (SV) y totales de los sustratos que se están investigando. Es importante destacar que, aunque el rendimiento específico de metano a menudo se relaciona con los SV, no siempre puede servir como la única base para evaluar completamente el potencial de producción de metano, ya que esto puede modificar debido a la composición de la materia orgánica. Por lo tanto, los SV se utilizan como un indicador primario del potencial de metano [34]. Los sólidos volátiles y totales son herramientas importantes para determinar un contenido adecuado del reactor en términos de inóculo y biomasa. La información obtenida de estas mediciones permite ajustar la carga orgánica del reactor, optimizar la producción de biogás y garantizar la estabilidad del proceso [29].

#### **6. Amonio ( $\text{NH}_4$ )**

Los desechos con altas concentraciones de proteínas o nitrógeno, como el estiércol de cerdo, los productos lácteos y el estiércol de pollo, pueden producir altos niveles de amoníaco

libre, que es tóxico para los microorganismos metanogénicos, resultando una baja generación de biogás. El nitrógeno amoniacal es menos inhibidor en su forma iónica ( $\text{NH}_4^+$ ) en comparación con el amoníaco libre ( $\text{NH}_3$ ), pero la distribución entre estas formas depende del pH y temperatura. En el proceso de DA puede tolerar un rango de concentración total de nitrógeno amoniacal que oscila entre 1500 y 7000 mg NL<sup>-1</sup>. Cuando el contenido de amoníaco es elevado, se inhibe la metanogénesis; Esto suele ser el resultado de la acumulación de AGV hasta el punto en que la capacidad tampón del digestor no es efectiva y el pH cae por debajo de 6 con la correspondiente pérdida progresiva de producción de metano [29].

### ***E. Biogás***

El biogás se produce en función de la descomposición de materia orgánica mediante la digestión anaeróbica. Este proceso natural, que ocurre sin oxígeno, produce principalmente gas metano que oscila entre un 50% y 70% del volumen total generado. También contiene  $\text{CO}_2$  y pequeñas cantidades de otros gases como  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  [40]. La producción de biogás se puede producir a partir de diferentes sustratos en función de su disponibilidad, como residuos y subproductos agroalimentarios, estiércol de ganado, residuos orgánicos municipales, etc [29]. Estos sustratos tienen una composición variable, lo que influye en los rendimientos de biogás y metano. Su potencia energética (calor) promedio varía entre 18.8 y 23.4 megajulios por metro cúbico ( $\text{MJ}/\text{M}^3$ ) [40].

En escala de laboratorio la producción de biogás es baja, especialmente durante el inicio del proceso, por lo tanto, medir un caudal tan bajo es desafío técnico importante. El biogás se lo puede medir de forma manual o automática [31].

El biogás producido en sistemas optimizados tiene un 80% de  $\text{CH}_4$  y 20% de  $\text{CO}_2$ , con un poder calorífico de 500 a 800  $\text{BTU}/\text{pie}^3$ , que es comparable al poder calorífico del gas natural, que normalmente oscila entre 950 y 1150  $\text{BTU}/\text{pie}^3$  [12].

#### ***1. Metano ( $\text{CH}_4$ )***

El  $\text{CH}_4$  es un potente gas de efecto invernadero, pero también puede potencialmente bioenergético en la matriz energética renovable. El metano de origen biológico ( $\text{CH}_4$ ), que se produce a partir de biomasa mediante procesos biológicos o termoquímicos, tiene un papel clave en la descarbonización de la economía. Sin embargo, la implementación de esta tecnología debe evaluarse cuidadosamente en función de los recursos biológicos disponibles y el impacto ambiental de las vías de conversión [41].

El metano generado como resultado de un subproducto puede ser empleado de forma directa en la producción de calor, electricidad y otros usos energéticos [24]. El aprovechamiento del metano ofrece una serie de beneficios ambientales y económicos, incluyendo la obtención

---

de energía renovable, disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y valorización de residuos [15].

### **2. Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )**

El  $CO_2$  es altamente polar y se disuelve fácilmente en agua, mientras que el metano y el hidrógeno tienen una baja capacidad de disolución en agua. La presencia de una cantidad significativa de  $CO_2$  disuelto tiene un impacto en el pH del entorno, lo que a su vez afecta la actividad de los microorganismos [31].

La valorización del  $CO_2$  del biogás puede tratarse como materia prima para producir productos comercializables mediante fermentación de gas. La mayoría de los intereses biotecnológicos se centran en la capacidad de los acetógenos para convertir  $CO_2$  y  $H_2$  en sustancias químicas con beneficios económicos, debido a que las comunidades microbianas implicadas en la fermentación del gas son complejas, es necesario identificar los organismos con mejor rendimiento para maximizar su producción química con costos mínimos [42].

### **3. Amoníaco ( $NH_3$ )**

La concentración adecuada de amoníaco es esencial para asegurar una digestión anaeróbica eficiente y mantener la estabilidad del proceso. Las proteínas presentes en la materia prima se descomponen en amoníaco durante la digestión. Un nivel bajo de nitrógeno amoniacal total (NAT) es crucial para el crecimiento microbiano, ya que permite la síntesis de aminoácidos y ácidos nucleicos, componentes esenciales para su desarrollo [38].

El  $NH_3$  también actúa como un amortiguador, neutralizando los ácidos orgánicos producidos por las bacterias fermentativas, lo que ayuda a mantener un pH neutro, un factor crítico para el crecimiento celular. Sin embargo, una concentración elevada de amoníaco (superior a 1,7 g/L) inhibe la producción de metano [38].

### **4. Hidrógeno ( $H_2$ )**

El hidrógeno es un fenómeno energético que posee una mayor densidad de energía por unidad de masa, superando en más de tres veces el promedio de los hidrocarburos líquidos, aunque su densidad volumétrica es significativamente menor [43]. La producción de  $H_2$  por métodos físico-químicos como la gasificación de carbón o el reformado con vapor es posible, estos procesos requieren condiciones de alta presión y temperatura que los encarecen. Por ello, la bioconversión anaeróbica de materiales orgánicos se presenta como una alternativa más accesible para generar y almacenar energía, con un gran potencial para su uso en el sector transporte [36].

Mediante la biotecnología de digestión anaeróbica de biomasa residual, se genera hidrógeno como un componente esencial, el cual puede ser utilizado a través de la

metanogénesis para producir metano [38]. El H<sub>2</sub> es un combustible alternativo prometedor para el transporte, con ventajas como la eficiencia energética, las emisiones limpias y la posibilidad de ser utilizado directamente en vehículos [43].

#### ***F. Lodos de aguas residuales urbanas***

Los lodos residuales mayormente se componen de sustancias orgánicas, células microbianas y partículas sólidas, siendo el componente principal el agua (>90%) [44]. Desde siempre la tecnología de digestión anaerobia ha estado centrada en la concentración de lodos, que funciona como carga orgánica en este sistema, no obstante, una carga orgánica elevada puede causar acidificación excesiva y, como resultado, inhibir el proceso de metanogénesis, por lo que es recomendable gestionar de manera adecuada la carga orgánica para lograr maximizar la eficiencia en el tratamiento [45].

El lodo resultante de la AD, una vez deshidratado, se considera producto “biosólido”. El lodo a menudo se mide como ST compuestos por una fracción orgánica también llamada SV y una fracción inorgánica o sólidos fijos [12]. Los lodos activos residuales, como biomasa residual rica en materia orgánica, es difícil de convertir en energía porque la mayor parte de la materia orgánica existe dentro de las células y es difícil de liberar [45].

#### ***G. Biodigestor***

Son sistemas específicamente creados para maximizar la generación de biogás sobre la base de residuos agrícolas, estiércol y desechos industriales. Su objetivo principal es capturar el metano (CH<sub>4</sub>) que se libera durante la descomposición de las fuentes orgánicas concurrentes en estos residuos sólidos. De esta manera, se logra convertir estos residuos en una fuente de energía útil, a la vez que se optimiza la emisión de GEI al ambiente [46].

Existen varios sistemas de digestores para el proceso de digestión anaeróbica de algún sustrato residual orgánico. Estos tipos de digestores dependen de factores operativos y de la naturaleza de los residuos a tratar, por ejemplo, la cantidad y tipo de sólidos ingresados. Estos se clasifican como digestores de laguna cubierta (utilizados para tratar estiércol líquido con menos de 2% de sólidos), digestores de mezcla completa (que tratan estiércol con 2 a 10% de sólidos), biodigestores de lecho fijo de flujo ascendente y descendente, biodigestores discontinuos y de agitación continua. reactores de tanque (digestores bajos en sólidos). El tipo de reactor/digestor empleado para la producción de biogás depende principalmente del tipo de sustratos tratados [18].

#### ***H. Cromatografía de gases***

La GC es una técnica analítica que separa y detecta compuestos químicos según su volatilidad o polaridad. La GC puede proporcionar información estructural de los compuestos



orgánicos, cuando se combina con una técnica de detección, como la espectrometría de masas (MS) o la detección de ionización de llama (FID [47]).

Este proceso implica que los componentes se distribuyan para separar entre la fase una estacionaria y móvil. La mezcla se introduce en una columna, donde interactúa con las sustancias cromatográficas presentes. Esta interacción físico-química conduce a la separación de las sustancias y se registran en forma de picos, se conoce como cromatogramas [48].

### ***I. Gases de efecto invernadero (GEI)***

Los GEI son sustancias que reemiten radiación infrarroja, atrapando la capa de calor en toda la atmósfera. Se originan tanto de fuentes naturales como de origen humano. Las emisiones de GEI de origen humano, como la inflamación de combustibles fósiles, deforestación y agricultura, se aumentado significativamente en los últimos siglos [49]. El crecimiento en las emisiones de GEI ha impulsado el calentamiento global, un cambio a largo plazo en el clima promedio del planeta Tierra [50].

El principal gas que causa este "efecto invernadero" es el CO<sub>2</sub>, aunque también intervienen el CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, entre otros diversos gases [2].

### ***J. Bioenergía***

La bioenergía representa una fuente de energía renovable que se basa en materiales biológicos en lugar de recursos carbonosos fósiles. Esta forma de energía sostenible no solo contribuye al desarrollo sostenible, sino que también minimiza las emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, para lograr un uso ético de la bioenergía que respalde un desarrollo sostenible, se requiere no solo la implementación de tecnología adecuada, sino también el fomento del conocimiento local [51].

Es fundamental resaltar que la cantidad de bioenergía producida depende en gran medida de la eficiencia de la tecnología de conversión, específicamente de la cogeneración [52]. Una forma sostenible de producir bioenergía es convertir estos residuos en biogás o biocombustible en lugar de incinerarlos o depositarlos en un relleno sanitario [3].

La bioenergía es la mayor fuente de energía renovable y representa el 9,6% del suministro energético total del mundo. Aproximadamente, la mitad de este suministro de bioenergía proviene de aplicaciones tradicionales como fuegos de leña y estufas, no obstante, se espera un aumento significativo en la biomasa adquirida de manera sostenible con el crecimiento previsto en la generación de bioenergía a medida que los países adopten cada vez más políticas de cambio climático y bioeconomía [20].

### ***K. Energías Renovables***

Las ventajas de usar fuentes de energía renovable son múltiples, desde la mitigación de emisiones de GEI hasta el impulso del crecimiento económico sostenible y responsable con el medio ambiente, pasando por el fortalecimiento de la seguridad energética. Entre estas fuentes destacan la energía hidráulica, geotérmica, solar, biomasa y eólica [53].

La luz solar, el viento, la biomasa y la energía hidroeléctrica están más disponibles en algunos lugares que en otros. La energía renovable (principalmente eólica y solar) representó el 5,7% del consumo total de energía en 2020, en comparación con el 3,3% en 2015. La hidroelectricidad y la energía nuclear mostraron pocos cambios y representaron alrededor del 7 y el 4%, respectivamente, en ambos años [2]. La energía limpia y renovable en forma de biogás se puede lograr mediante la DA de los desechos [18].

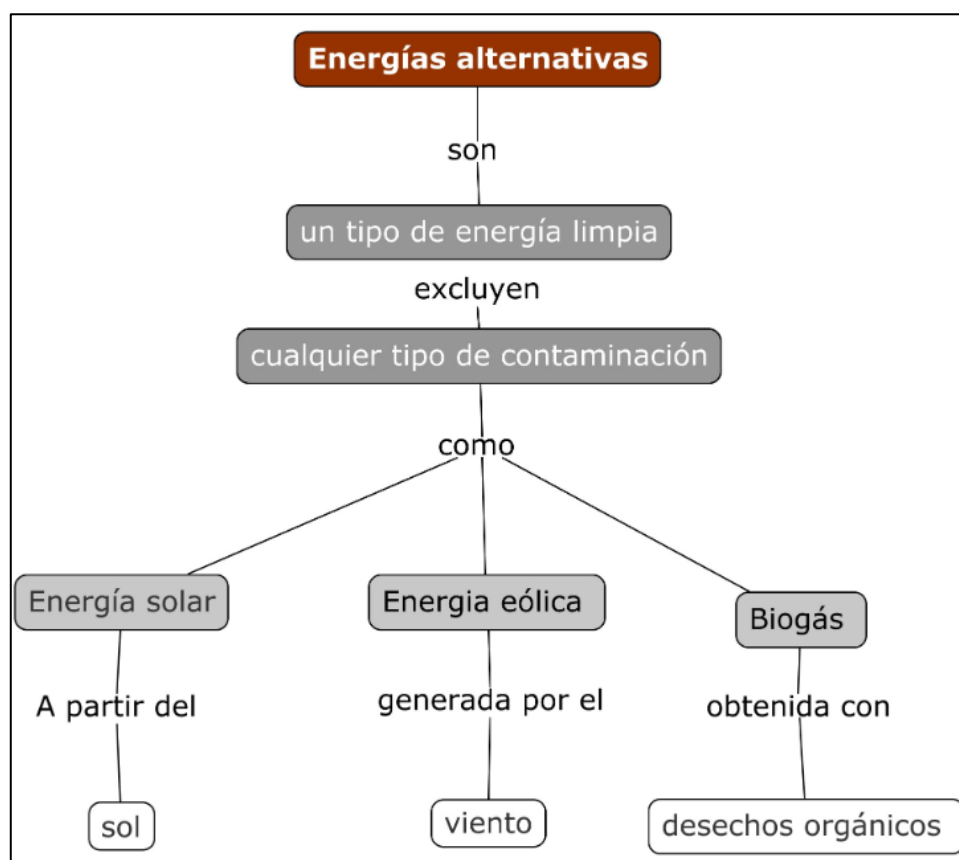


Fig. 3. Síntesis de Energías Renovables o Alternativas [54].

## VII. METODOLOGIA

El método que se empleó en el proyecto de investigación es de tipo experimental, y se analizó la variable dependiente (pureza de metano en porcentaje) e independiente (relación volumétrica de lixiviado de relleno sanitario/lodos de aguas residuales urbanas en cada biorreactor).

### A. Recolección de la muestra

Se recolectó aproximadamente 1 galón de lixiviado joven del relleno sanitario Ceibales, del cantón Machala (Fig. 4) y se recogió 2 kg de muestras de lodos de aguas residuales del estero “El Macho” de la parroquia La Providencia (Fig. 5). Una vez recogidas las muestras de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas, se almacenaron en un cooler a 4°C y posteriormente se trasladaron al Laboratorio de Aplicaciones de Electroquímica y Bioenergía de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud en la Universidad Técnica de Machala.

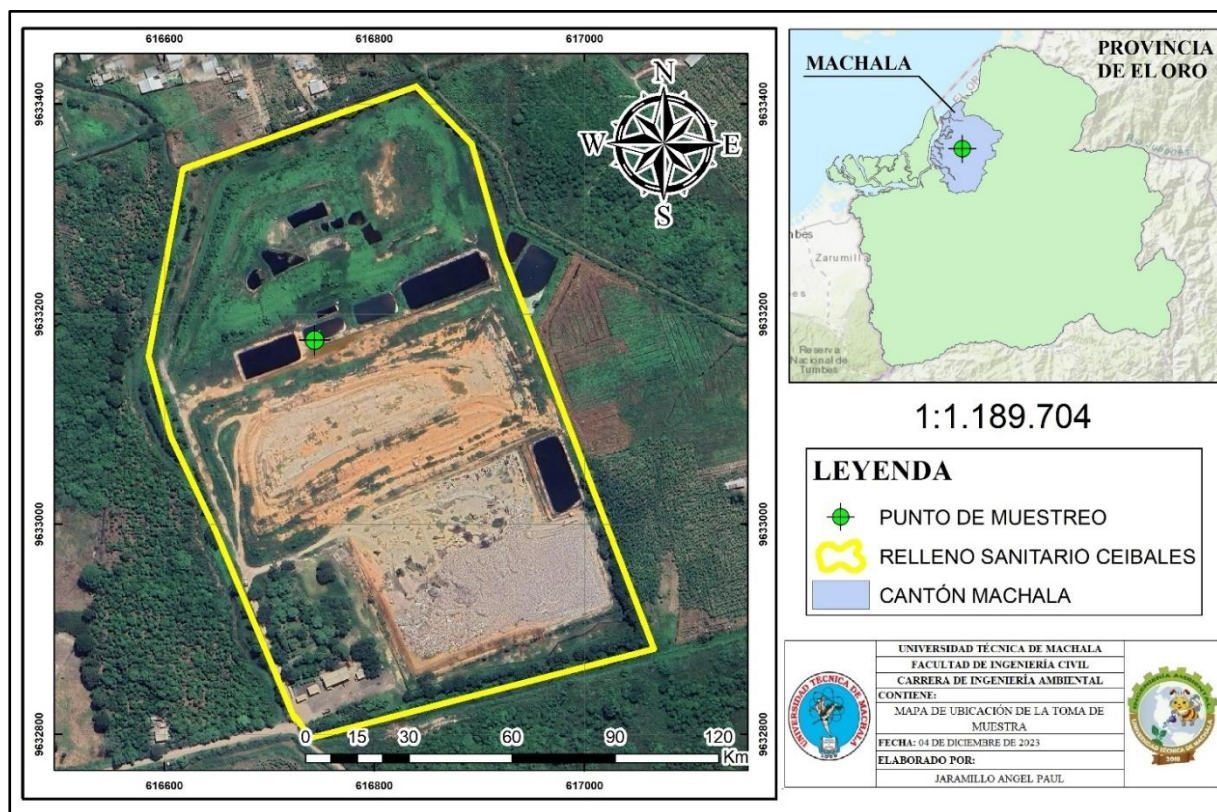


Fig. 4. Mapa de ubicación de la toma de muestra de lixiviado de relleno sanitario

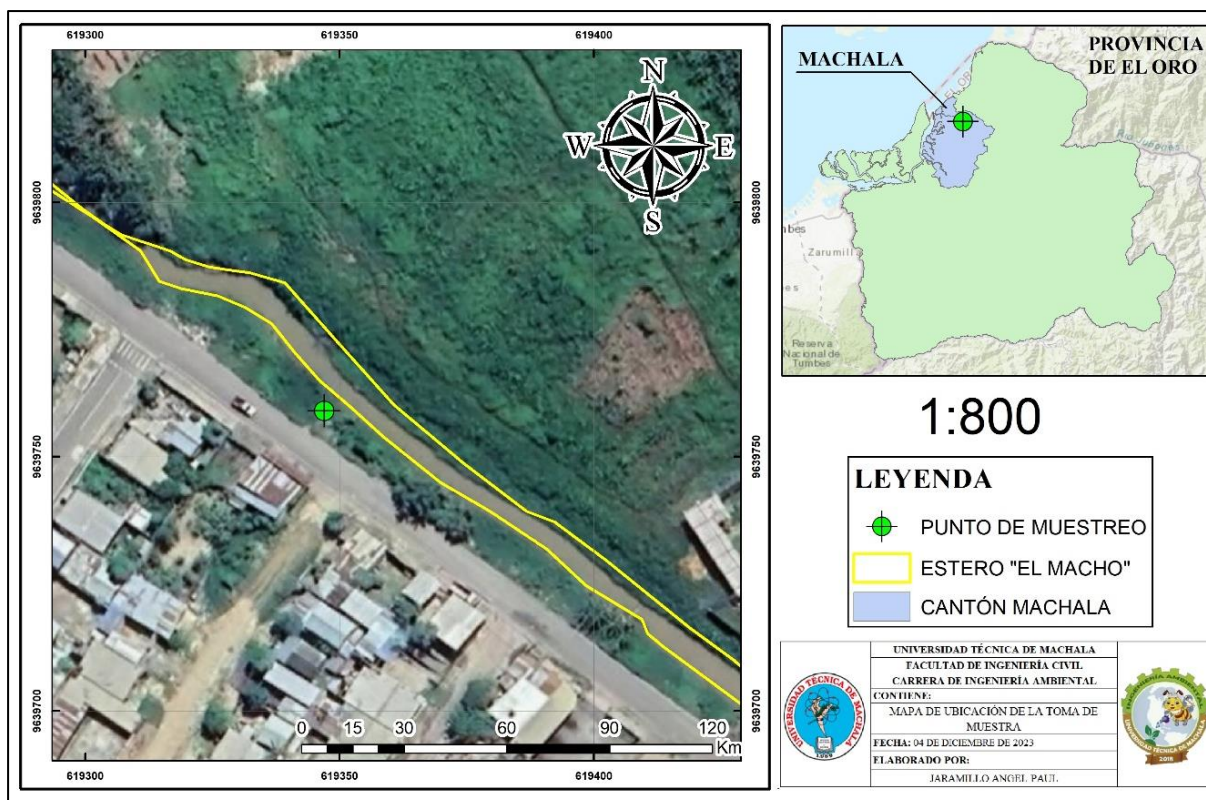


Fig. 5. Mapa de ubicación de la toma de muestra de lodos de aguas residuales urbanas

A continuación, en la TABLA IV se muestran las coordenadas (X, Y) en UTM (Universal Transversal de Mercator) donde se obtuvieron las muestras de lodos de aguas residuales urbanas y lixiviado de relleno sanitario.

TABLA IV  
COORDENADAS DE LA TOMA DE MUESTRA

Punto	Lodos de aguas residuales urbanas		Lixiviado de relleno sanitario	
	X	Y	X	Y
1	619347	9639759	616743	9633175

## B. Caracterización fisicoquímica

### 1. Lixiviado de relleno sanitario

El lixiviado de relleno sanitario se analizó de acuerdo con el Standard Methods [55]. Los parámetros que se caracterizaron fueron el potencial de hidrógeno (pH), ácidos grasos volátiles (AGV), sólidos disueltos totales (SDT), carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO) y temperatura (°C). Previamente el lixiviado, se pretrató con una malla de 2 mm para remover las partículas más grandes.

#### a. pH

- **Equipos:** Potenciómetro
- **Materiales:** Vaso precipitado, piceta.



- **Reactivos:** solución buffer de pH 4, 7, 10 y agua destilada
- **Procedimiento:** Previamente al análisis de pH, se ajustó el potenciómetro usando soluciones buffer normalizadas. Seguidamente, se limpió el electrodo con agua destilada y una pequeña porción de la muestra a analizar, luego se añadió 100 mL de lixiviado en un vaso precipitado. Finalmente, se sumergió el potenciómetro en la muestra, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *b. Ácidos Grasos Volátiles*

- **Equipos:** Ultracentrífuga 4.0, pH-metro, Agitador magnético con calentamiento
- **Materiales:** Vasos precipitados, Probeta, Bureta, Papel aluminio
- **Reactivos:** Ácido clorhídrico (HCl) a 0.1 N, Hidróxido de sodio (NaOH) a 0.1 N
- **Procedimiento:** Según la técnica de titulación, se tomó 60 mL de lixiviado de relleno sanitario y se centrifugó a 13.000 rpm durante 10 minutos a 4°C, posteriormente se separó el sobrenadante (liquido superior) en una probeta hasta los 50 mL, seguidamente se transfirió el sobrenadante a un vaso precipitado y puesto sobre el agitador magnético. Se midió el pH inicial de la muestra y se tituló la muestra con HCl a 0.1 N hasta alcanzar un pH de 3.0 (El consumo se registró como X mL).

Finalmente, se cubrió el vaso precipitado con papel aluminio perforado y se calentó la muestra en una plancha de calentamiento hasta alcanzar el punto de ebullición. Se mantuvo la ebullición durante 3 minutos desde la primera burbuja. Se apagó la plancha de calentamiento y se esperó 2 minutos. Posteriormente, se tituló la muestra con NaOH 0.1N hasta alcanzar un pH de 6.5 (El consumo se registró como Y mL).

- **Cálculo:**

$$AGV \left( \frac{mep}{L} \right) = \frac{Y \text{ mL} * 0.1 \frac{meq}{mL} * 1000}{\text{Volumen de muestra (mL)}} \quad (1)$$

$$\text{Acidez total} \left( \frac{mep}{L} \right) = \frac{X \text{ mL} * 0.1 \frac{meq}{mL} * 1000}{\text{Volumen de muestra (mL)}} \quad (2)$$

Donde:

X mL = Consumo de HCl

Y mL = Consumo de NaOH

#### *c. Sólidos Disueltos Totales (SDT)*

- **Equipos:** Medidor portátil TDS

- **Materiales:** Vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** Agua destilada
- **Procedimiento:** Se añadió 80 mL de lixiviado de relleno sanitario en un vaso precipitado de 100 mL, seguidamente se sumergió el electrodo medidor portátil de TDS, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *d. Carbono Orgánico Total (COT)*

- **Equipos:** Medidor portátil COT
- **Materiales:** Vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** Agua destilada
- **Procedimiento:** Se añadió 80 mL de lixiviado de relleno sanitario en un vaso precipitado de 100 mL, seguidamente se sumergió el electrodo medidor portátil de COT, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *e. Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

- **Equipos:** Medidor portátil DQO
- **Materiales:** vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** agua destilada
- **Procedimiento:** Se añadió 80 mL de lixiviado de relleno sanitario en un vaso precipitado de 100 mL, seguidamente se sumergió el electrodo medidor portátil de DQO, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *f. Temperatura (°C)*

- **Equipos:** Medidor portátil de temperatura
- **Materiales:** vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** agua destilada
- **Procedimiento:** Se añadió 80 mL de lixiviado de relleno sanitario en un vaso precipitado de 100 mL, seguidamente se sumergió el electrodo medidor portátil de temperatura, se esperó la estabilización y el registro resultante.

### *2. Lodos de aguas residuales urbanas*

Los parámetros como humedad (%) y materia orgánica (%) se caracterizaron en referencia al método de calcinación [56]; así mismo, el pH y temperatura de acuerdo al Stándar Methods [55].

#### *a. Humedad*

- **Equipos:** balanza analítica, estufa
- **Materiales:** crisol, paleta, desecador.

- **Procedimiento:** Según la técnica gravimétrica, se registró el peso 10 gr de lodo de agua residual urbana en un crisol tarado y se colocó la muestra dentro de la estufa a 105°C durante 24 horas. Finalmente, se colocó dentro de un desecador para que se enfríe la muestra durante 30 minutos, se retiró la muestra y se pesó. Una vez registrados los datos, se procedió a calcular.

- **Cálculo:**

$$H\% = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

H% = porcentaje de humedad

W1 = Peso de la muestra humedad en gr

W2 = Peso de la muestra seca en gr

#### ***b. Materia orgánica***

- **Equipos:** balanza analítica digital, mufla
- **Materiales:** crisol, paleta, desecador
- **Procedimiento:** Se pesaron cinco gramos de lodos de aguas residuales urbano en cápsulas de porcelana previamente taradas, luego las muestras se secaron en una mufla a una temperatura de 105°C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se enfriaron las muestras en un desecador y se obtuvo el peso inicial en una balanza analítica. Posteriormente, se introdujeron las muestras en una mufla a una temperatura de 360°C durante 2 horas. Rápidamente, se enfriaron nuevamente en un desecador de vidrio y se pesaron en la balanza analítica digital. La MO presente en la muestra se calculó por la diferencia entre el peso inicial y el peso final.

- **Calculo:**

$$MO\% = \frac{\text{peso inicial (105°C)} - \text{peso final (360°)}}{\text{peso inicial (105°)}} \times 100 \quad (4)$$

#### ***c. Potencia del Hidrógeno (pH)***

- **Equipos:** balanza analítica digital, potenciómetro
- **Materiales:** vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** agua destilada
- **Procedimiento:** Se pesaron treinta gramos de lodos de aguas residuales urbano en un vaso de 100 mL, luego se añadió 30 mL de agua destilada, rápidamente se procedió a

homogenizar la muestra con un agitador durante 1 minuto. Finalmente, se introduce el electrodo del potenciómetro, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *d. Temperatura (°C)*

- **Equipos:** balanza analítica digital, medidor portátil de temperatura
- **Materiales:** vaso precipitado, piceta
- **Reactivos:** agua destilada
- **Procedimiento:** Se pesaron 30 gr de lodos de aguas residuales urbano en un vaso de 100 mL, luego se añadió 30 mL de agua destilada, rápidamente se procedió a homogenizar la muestra con un agitador durante 1 minuto. Finalmente, se introduce el medidor portátil de temperatura, se esperó la estabilización y el registro resultante.

#### *C. Porcentaje de mezcla de lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas en los biorreactores*

Se utilizó como guía la metodología de Berenjkar *et al.* [57], que consistió de cinco tratamientos que incluían 0, 5, 10, 20 y 40 % v/v de lixiviado con una mezcla de lodos crudos y lodos digeridos en una capacidad total de 600 mL y volumen de mezcla de 500 mL.

El presente diseño experimental, se mezcló lodos de aguas residuales urbanas con diferentes cantidades de lixiviado de relleno sanitario, la cual tuvo un porcentaje de lodo de aguas residuales urbanas de 12.5, 25 y 50 % v/v completando el 100% con lixiviado de relleno sanitario, para un volumen de 900 mL de mezcla. Los biorreactores batch fueron de régimen estacionario, con capacidad total de 1000 mL y un volumen de mezcla de 900 mL para cada tratamiento, tratando de optimar el mayor rendimiento de metano en función del contenido de lixiviado, cómo se muestra en la siguiente tabla:

TABLA V  
RELACIÓN VOLUMÉTRICA DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO Y LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

<b>Biorreactor</b>	<b>Lixiviado de relleno sanitario (mL)</b>	<b>Lodos de aguas residuales urbanas (mL)</b>	<b>Lodos de aguas residuales urbanas en porcentaje (v/v)</b>
<b>R1</b>	787.5	112.5	12.5
<b>R2</b>	675	225	25
<b>R3</b>	450	450	50

#### *D. Cromatografía de gases*

Para evaluar el porcentaje de pureza de CH<sub>4</sub> en una bolsa de biogás, se utilizó un cromatógrafo de gases FULI 9790 II. El cromatógrafo consta de una jeringa de gas de 5 ml para inyectar la muestra de biogás, una columna capilar de 30 m x 0,32 mm x 40 μm para separar



los componentes del biogás, detector de ionización de llama (FID) a 350°C, hidrógeno como gas portador y aire comprimido como disolvente para detectar la pureza de metano [58].

#### ***E. Evaluación estadística de los resultados***

Se aplicó el software IBM SPSS Statistics 22 para analizar los resultados de la correlación entre la variable dependiente (pureza de metano en porcentaje) e independiente (relación volumétrica de lixiviado de relleno sanitario/lodos de aguas residuales urbanas en cada biorreactor).

## VIII. RESULTADOS

### A. Análisis físico-químico de los sustratos residuales

En la TABLA VI, se presenta los análisis fisicoquímicos de los lodos de aguas residuales urbanos y el lixiviado de relleno sanitario, utilizando el método de calcinación y Standar Methods.

TABLA VI  
RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO Y LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

	pH	AGV (mg/L)	SDT (ppm)	COT (mg/L)	DQO (mg/L)	Temperatura (°C)	M.O (%)	Humedad (%)
<b>Lixiviado de relleno sanitario</b>	8.3	5.6	999	20.1	20.1	24.5	N/A	N/A
<b>Lodos de aguas residuales urbanas</b>	7.4	N/A	N/A	N/A	N/A	26.7	41.43	48.70

Los parámetros más importantes para el proceso de DA en la producción de  $\text{CH}_4$ , es el potencial de hidrógeno (pH) y ácidos grasos volátiles (AGV). Los resultados indican que el ingreso de la muestra de lixiviado de relleno sanitario a cada biorreactor aplicado (R1, R2, R3) tiene un pH de 8.3 y 5.6 mg/L AGV, mientras que el ingreso de la muestra de lodo de aguas residuales urbanas a cada biorreactor (R1, R2, R3) contiene un pH de 7.4.

### B. Pureza de metano mediante cromatografía de gases.

En las Fig. 6, 7 y 8 se puede observar la pureza de metano en porcentaje en los diferentes tratamientos aplicados (R1, R2 y R3) mediante cromatografía de gases. Las muestras de biogás en los tres biorreactores fueron analizadas cada 2 días hasta el día 20, con el objetivo de evaluar el rendimiento de  $\text{CH}_4$  en función de los días de digestión.

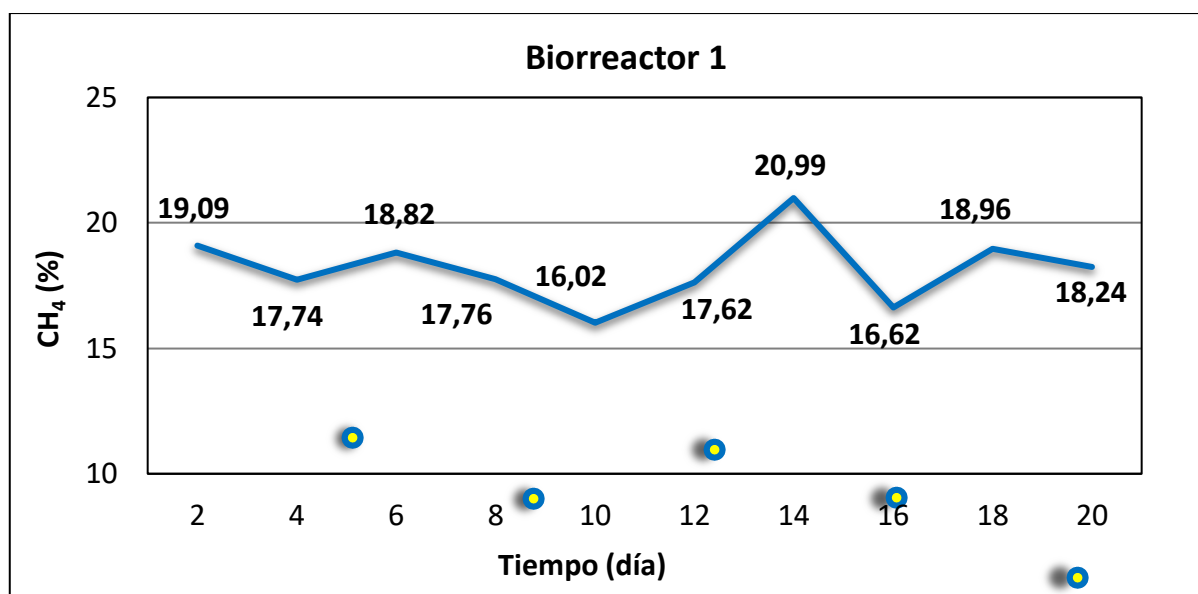


Fig. 6. Pureza de  $\text{CH}_4$  (%) en R1 en función de los días de digestión

En la Fig. 6, se observa el porcentaje de  $\text{CH}_4$  de R1, cuya composición fue de 12.5 % v/v de lodos de aguas residuales urbanas y 87.5 % v/v de lixiviado de relleno sanitario, indicando que en el día 14 alcanzó una mayor producción de  $\text{CH}_4$  equivalente a un valor de 20,99 %, mientras que la menor producción de metano se produjo en el día 10 con un 16,02%. El porcentaje medio de  $\text{CH}_4$  es del 18.19% durante los 20 días de digestión anaerobia.

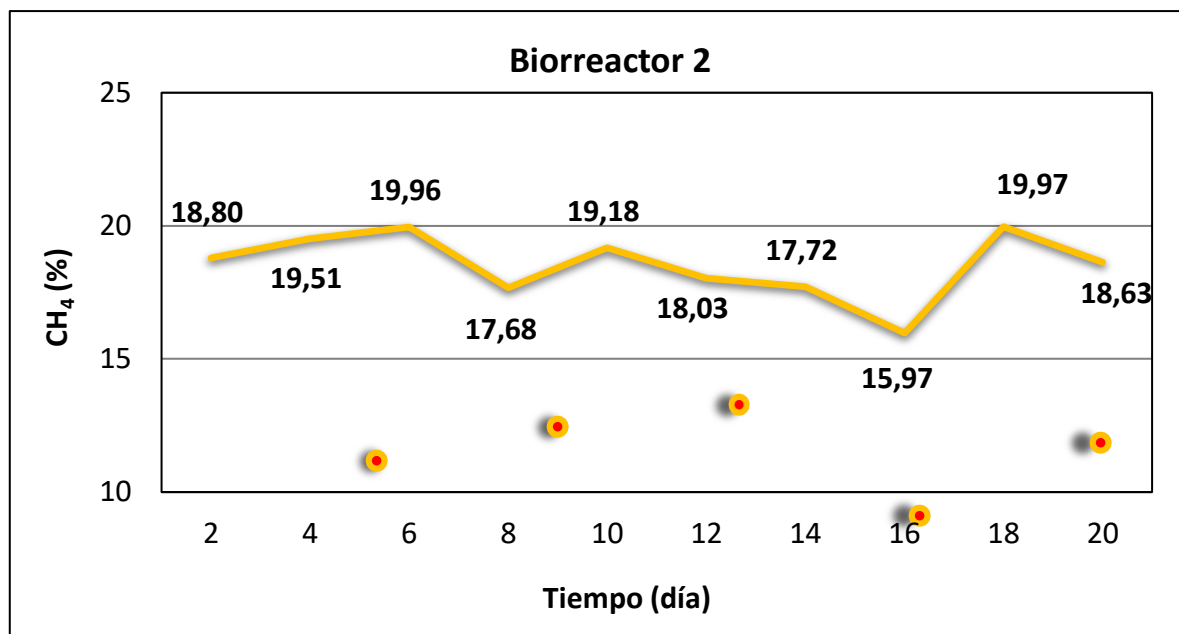


Fig. 7. Pureza de  $\text{CH}_4$  (%) en R2 en función de los días de digestión

De igual manera, en la Fig. 7 se observa el porcentaje de  $\text{CH}_4$  obtenidos de R2, cuyo tratamiento tuvo una composición de 25 % v/v de lodos de aguas residuales urbanas y 75 % v/v de lixiviado de relleno sanitario, indicando que en el día 18 logró la mayor producción de  $\text{CH}_4$  equivalente a un valor de 19,97 %, el cual no tuvo diferencia significativa con el día 6 con un valor de 19,96 % de  $\text{CH}_4$ . Sin embargo, la menor producción de metano se produjo en el día 16 con un 15,97 %. El contenido medio de  $\text{CH}_4$  alcanzó el 18.55 % durante los 20 días de operación.

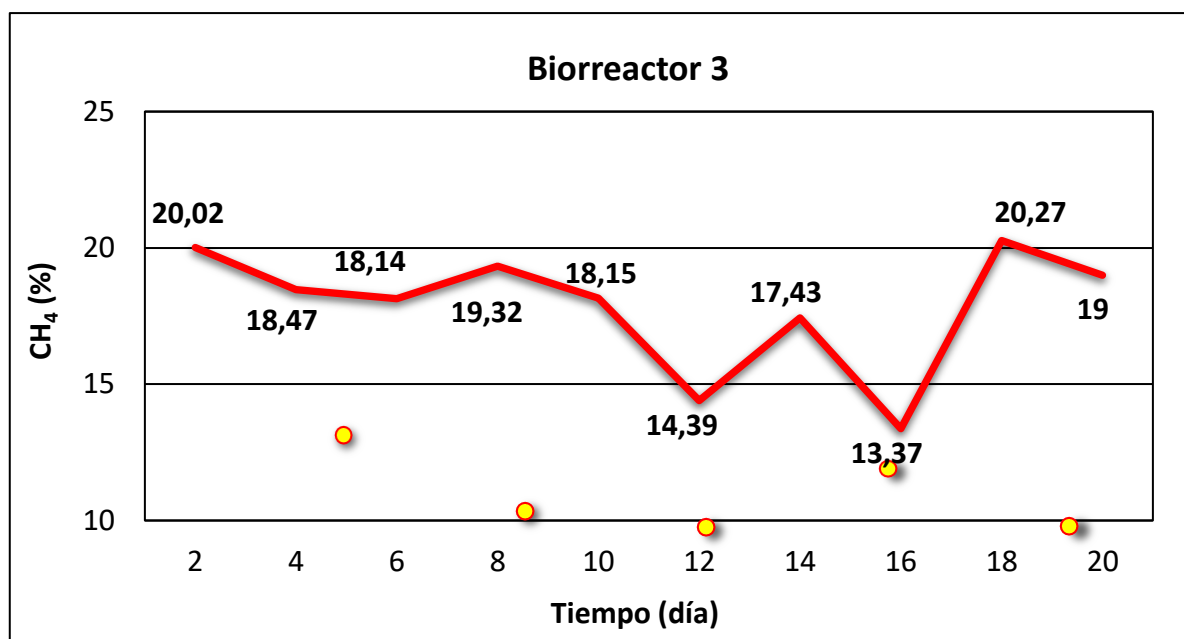


Fig. 8. Pureza de CH<sub>4</sub> (%) en R3 en función de los días de digestión

Por otro lado, en la Fig. 8 se presenta el porcentaje de CH<sub>4</sub> mediante análisis cromatográfico en R3, cuya composición fue de 50% v/v de lodos de aguas residuales urbanas y 50% v/v de lixiviado de relleno sanitario. Este tratamiento alcanzó una generación de 20,27% CH<sub>4</sub> en el día 18, similar a los primeros días de digestión anaerobia (día 2) que consiguió un rendimiento de 20,02% CH<sub>4</sub>. Por lo contrario, la menor producción de CH<sub>4</sub> se generó en el día 16 equivalente a un valor de 13,37%. La producción media de CH<sub>4</sub> fue de 17,86% durante el tiempo de 20 días.

A continuación, en la Fig. 9 se muestra los tres tratamientos aplicados (R1, R2 y R3) con sus respectivos datos de mayor rendimiento de CH<sub>4</sub> en los 20 días de digestión.

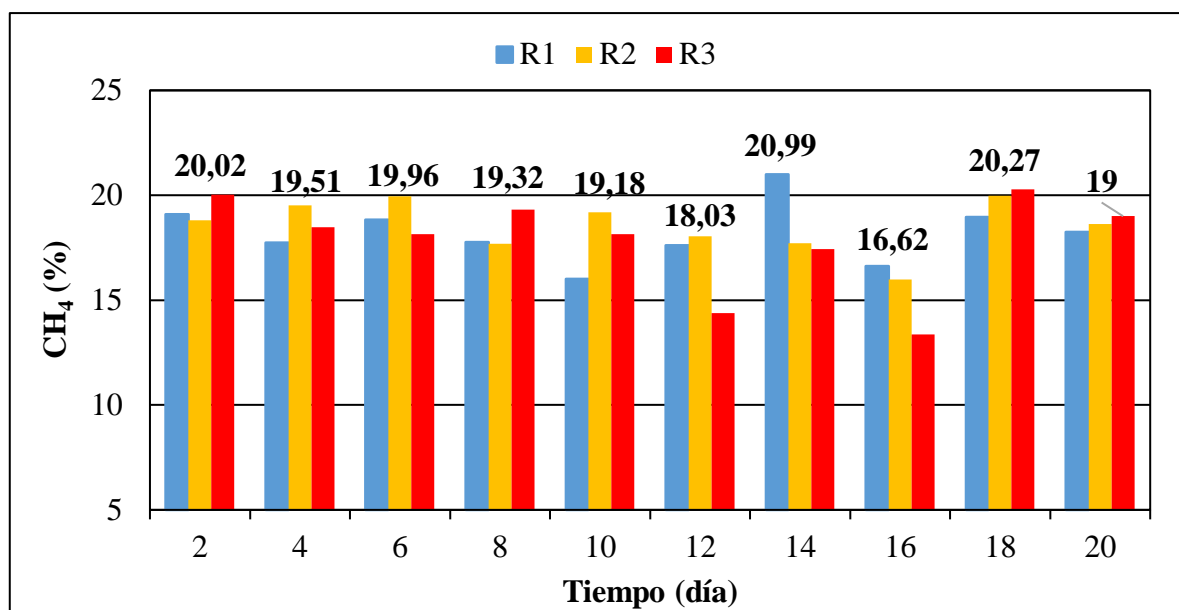


Fig. 9. Efecto de los tratamientos aplicados en términos de pureza de CH<sub>4</sub> obtenido durante los 20 días de experimentación.

Según los resultados obtenidos, R1 es el tratamiento que tiene la mayor producción de metano al día 14 de operación con un valor de 20,99 %, sin embargo, en R3 se encontraron valores similares de 20,02 % y 20,27 % de CH<sub>4</sub> en los días 2 y 18, respectivamente. Por otro lado, R2 tuvo resultados similares durante los días de digestión 4, 6 y 10, que representan valores parejos de 19,51%, 19,96% y 19,18% en términos de pureza de CH<sub>4</sub>. La composición media de CH<sub>4</sub> comprendía entre un 18,19%, 18,55% y 17,86% para los diferentes tratamientos aplicados (R1, R2, R3) en los 20 días de digestión.

### C. Análisis estadísticos entre la pureza de metano y los tratamientos aplicados a los biorreactores.

La TABLA VII muestra un ANOVA en la evaluación de porcentaje CH<sub>4</sub> en función de la relación volumétrica de lodos de aguas residuales urbanas y lixiviado de relleno sanitario en tres biorreactores (R1, R2, R3) durante 20 días de digestión. El análisis estadístico se determinó con un nivel de confiabilidad del 95 %.

TABLA VII  
ANOVA DE CH<sub>4</sub> (%)

	Suma de cuadrados	gl	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico para F
Entre grupos	2,37500667	2	1,18750333	0,41043935	3,35413083
Dentro de los grupos	78,11773	27	2,89324926		
Total	80,4927367	29			

Si el valor crítico para F es mayor al resultado de F revela que no hubo diferencias significativas en cada uno de los biorreactores aplicados con relación al porcentaje de metano. En este caso, el valor obtenido es de  $0,41(F) < 3,35$  (valor crítico para F) en este análisis estadístico.

## IX. DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de la TABLA VI, los parámetros más importantes para la eficiencia la digestión anaerobia, son pH y AGV. El pH es un parámetro importante para la producción de CH<sub>4</sub>, en el cual las arqueas metanogénicas son extremadamente sensibles a los cambios de pH, el rango óptimo oscila entre 6.5 y 7.2, a partir de un pH 8.0 se produce ácido acético y ácido propiónico [59]. Por otro lado, la producción de AGV puede ser tóxica para los microorganismos metanogénicos [59], la concentración de AGV puede variar, por ejemplo, las concentraciones inhibitorias máximas de ácido propiónico fluctúan de 0,8 a 21,6 g/L (800 a 21600 mg/L) [38].

El presente estudio experimental, reveló que una proporción de lodos de aguas residuales urbanas de hasta 50 % v/v no tuvo un dominio fundamental en el rendimiento de CH<sub>4</sub>. Según Gao *et al.* [26] asegura que mientras se aumenta la cantidad de lixiviados de relleno sanitario, reduce la transmitancia de grupos funcionales de los lodos, indicando que los grupos funcionales químicos de las moléculas de proteínas y polisacáridos sufren cambios significativos por el lixiviado, así mismo demostraron que el ácido húmico contenido en los lixiviados de los relleno sanitario aceleró los procesos de solubilización, hidrólisis y acidogénesis de los compuestos orgánicos, pero obstaculizó la conversión de acetato e inhibió la producción de metano. Esto significa que nuestros resultados fueron menores porque utilizamos mayor proporción de lixiviados jóvenes de relleno sanitario, en presencia de un pH inicial de 8.5, lo que se traduce en menor rendimiento de porcentaje de CH<sub>4</sub>.

Otras investigaciones afirman resultados positivos, por ejemplo, Berenjkar *et al.* [57] mencionaron que el mayor rendimiento de CH<sub>4</sub> fue de T2 y control (5% y 0% v/v lixiviado maduro con mezcla de lodos crudos y lodos digeridos) en una media que comprendía entre un 66 % y 68 % de CH<sub>4</sub>.

En otro estudio, Li *et al.* [60] mostraron mayores contenidos de metano con valores de 61%, 62,9%, 65,5% y 68,9% con proporciones de 0%, 5%, 15%, 30% v/v de lixiviado joven con mezclas de lodos primarios y lodos activos residuales, respectivamente.

Se puede evidenciar en la siguiente TABLA VII, que no existe diferencias significativas en el rendimiento de CH<sub>4</sub> en los tres biorreactores aplicados. Estudios complementarios, informaron similarmente que a través del análisis ANOVA, no fue significativo (P>0.05) el rendimiento de los tratamientos 0, 5, 10, 20 y 40% (v/v) de lixiviado y los días experimentales (desde el día 2 hasta el día 13) sobre la composición del porcentaje de CH<sub>4</sub>, mostrando que no existe variabilidad de resultados entre los diferentes tratamientos aplicados [57].

---

## X. CONCLUSIONES

- Se caracterizó fisicoquímicamente el lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales mediante el método de calcinación y Standar Methods. Según los análisis del lixiviado de relleno sanitario se registró 5.6 mg/L AGV, 8.3 pH, 999 ppm SDT, 20.1 mg/L COT, 20.1 DQO y 24.5°C de temperatura. Por otro lado, los resultados de los lodos de aguas residuales urbanas fueron 7.4 pH, 26.7°C, 41.43% M.O y 48,70% de humedad.
- Se prepararon tres biorreactores (R1, R2 y R3) de régimen estacionario tipo batch con capacidad total de 1000 mL para mezclar 12.5, 25 y 50% v/v de lodos de aguas residuales urbanas completando el 100 % con diferentes cantidades de lixiviado de relleno sanitario, para un volumen de 900 mL de mezcla.
- La cuantificación de pureza de metano se la obtuvo a través del cromatógrafo de gases, indicando que el tratamiento R2 es el que mejor resultados obtuvo durante todo el proceso de operación, manteniendo constante un porcentaje promedio de 18,55 % CH<sub>4</sub> en el tiempo para esa relación lodo/lixiviado (25%/75% v/v).
- Se evaluó la correlación de pureza de CH<sub>4</sub> (%) y los tratamientos aplicados en el software estadístico SPSS a través de análisis de varianzas (ANOVA), donde se pudo evidenciar que no existió diferencias significativas en el rendimiento de CH<sub>4</sub> en los tres biorreactores experimentados durante los 20 días de codigestión anaerobia.



---

## XI. RECOMENDACIONES

- Analizar otros parámetros del lixiviado de relleno sanitario y lodos de aguas residuales urbanas como: nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo total, metales pesados (cadmio, plomo, zinc) y actividad microbiana para optimizar las concentraciones y/o dosis en la generación de CH<sub>4</sub>.
- Mejorar el proceso de codigestión anaerobia, mediante la adición de sustratos residuales que contengan gran cantidad de lignocelulosa, como la cascara de banano pretratada, que puede ser usado como fuente de carbono para aumentar la pureza de CH<sub>4</sub>.
- Impulsar la investigación científica aplicada en materia de bioenergía, especialmente en el desarrollo de biotecnologías para la generación de bioenergía en función de residuos orgánicos, que puedan ayudar el desarrollo sostenible de la matriz energética del país.
- Investigar métodos de pretratamiento físico-químicos, como la ozonización y la oxidación avanzada, para mejorar la biodegradabilidad del lixiviado de relleno sanitario cuyo fin es maximizar la obtención de biogás (CH<sub>4</sub>) en el proceso de codigestión anaeróbica.
- Desarrollar pruebas experimentales de digestión anaeróbica con mayor porcentaje de lodos de aguas residuales urbanas (>50 % v/v), aplicando otras variables críticas de proceso como: temperatura de biorreactor, agitación y ajuste de pH, para evaluar la eficiencia de biogás metano.

## REFERENCIAS

- [1] C. Nava Escudero, «Desalación de agua y justicia energética. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible», *Cuest. Const.*, pp. 243-272, nov. 2022, doi: 10.22201/ij.24484881e.2022.47.17529.
- [2] J. L. Holechek, H. M. E. Geli, M. N. Sawalhah, y R. Valdez, «A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050?», *Sustainability*, vol. 14, n.º 8, Art. n.º 8, ene. 2022, doi: 10.3390/su14084792.
- [3] M. Hakimi, M. D. Manogaran, R. Shamsuddin, S. A. Mohd Johari, M. Abdalla M Hassan, y T. Soehartanto, «Co-anaerobic digestion of sawdust and chicken manure with plant herbs: Biogas generation and kinetic study», *Heliyon*, vol. 9, n.º 6, p. e17096, jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17096.
- [4] J. Fernández-Rodríguez, M. Di Berardino, y S. Di Berardino, «Promoting the Circular Economy on an Island: Anaerobic Co-Digestion of Local Organic Substrates as a Possible Renewable Energy Source», *Microorganisms*, vol. 11, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11020285.
- [5] Y. Song, W. Qiao, M. Westerholm, G. Huang, M. J. Taherzadeh, y R. Dong, «Microbiological and Technological Insights on Anaerobic Digestion of Animal Manure: A Review», *Fermentation*, vol. 9, n.º 5, p. 436, may 2023, doi: 10.3390/fermentation9050436.
- [6] M. Zupančič, V. Možic, M. Može, F. Cimerman, y I. Golobič, «Current Status and Review of Waste-to-Biogas Conversion for Selected European Countries and Worldwide», *Sustainability*, vol. 14, n.º 3, p. 1823, feb. 2022, doi: 10.3390/su14031823.
- [7] H. Pasalari, M. Ghasemian, A. Esrafil, M. Gholami, y M. Farzadkia, «Upgrading the biogas production from raw landfill leachate using O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pretreatment process: Modeling, optimization and anaerobic digestion performance», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 247, p. 114222, dic. 2022, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114222.
- [8] H. A. Aziz, S. F. Ramli, y Y.-T. Hung, «Physicochemical Technique in Municipal Solid Waste (MSW) Landfill Leachate Remediation: A Review», *Water*, vol. 15, n.º 6, Art. n.º 6, ene. 2023, doi: 10.3390/w15061249.
- [9] L. Shen *et al.*, «National quantifications of methane emissions from fuel exploitation using high resolution inversions of satellite observations», *Nat. Commun.*, vol. 14, n.º 1, p. 4948, ago. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-40671-6.
- [10] C.-M. Nzotungicimpaye, A. J. MacIsaac, y K. Zickfeld, «Delaying methane mitigation increases the risk of breaching the 2 °C warming limit», *Commun. Earth Environ.*, vol. 4, n.º 1, p. 250, jul. 2023, doi: 10.1038/s43247-023-00898-z.
- [11] H. I. Romero, C. A. Vega, J. D. Zuma, F. F. Pesantez, A. G. Camacho, y F. F. Redrovan, «Comparison of the methane potential obtained by anaerobic codigestion of urban solid waste and lignocellulosic biomass», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 776-780, feb. 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.10.013.
- [12] B. Shrestha *et al.*, «A Review of Pretreatment Methods to Enhance Solids Reduction during Anaerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludges and the Resulting Digester Performance: Implications to Future Urban Biorefineries», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 24, p. 9141, dic. 2020, doi: 10.3390/app10249141.
- [13] S. Vaidh, D. Parekh, D. Patel, y G. S. Vishwakarma, «Leachate treatment potential of nanomaterial based assemblies: a systematic review on recent development», *Water Sci. Technol.*, vol. 85, n.º 11, pp. 3285-3300, jun. 2022, doi: 10.2166/wst.2022.168.
- [14] T. M. Cárdenas-Ferrer, «Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en Vertedero de Sagua La Grande».

- 
- [15] A. Barragán-Escandón, J. M. Olmedo Ruiz, J. D. Curillo Tigre, y E. F. Zalamea-León, «Assessment of Power Generation Using Biogas from Landfills in an Equatorial Tropical Context», *Sustainability*, vol. 12, n.º 7, p. 2669, mar. 2020, doi: 10.3390/su12072669.
- [16] G. Çınar *et al.*, «Effects of environmental and housing system factors on ammonia and greenhouse gas emissions from cattle barns: A meta-analysis of a global data collation», *Waste Manag.*, vol. 172, pp. 60-70, dic. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.09.007.
- [17] S. Abedi, A. Nozarpour, y O. Tavakoli, *Energy Nexus*, vol. 11, p. 100218, sep. 2023, doi: 10.1016/j.nexus.2023.100218.
- [18] Z. Tshemese, N. Deenadayalu, L. Z. Liganiso, y M. Chetty, «An Overview of Biogas Production from Anaerobic Digestion and the Possibility of Using Sugarcane Wastewater and Municipal Solid Waste in a South African Context», *Appl. Syst. Innov.*, vol. 6, n.º 1, p. 13, ene. 2023, doi: 10.3390/asi6010013.
- [19] M. Casallas-Ojeda, S. Meneses-Bejarano, R. Urueña-Argote, L. F. Marmolejo-Rebellón, y P. Torres-Lozada, «Techniques for Quantifying Methane Production Potential in the Anaerobic Digestion Process», *Waste Biomass Valorization*, vol. 13, n.º 5, pp. 2493-2510, may 2022, doi: 10.1007/s12649-021-01636-2.
- [20] M. J. Blair, B. Gagnon, A. Klain, y B. Kulišić, «Contribution of Biomass Supply Chains for Bioenergy to Sustainable Development Goals», *Land*, vol. 10, n.º 2, p. 181, feb. 2021, doi: 10.3390/land10020181.
- [21] F. Zamora-Polo, J. Sánchez-Martín, M. Corrales-Serrano, y L. Espejo-Antúnez, «What Do University Students Know about Sustainable Development Goals? A Realistic Approach to the Reception of this UN Program Amongst the Youth Population», *Sustainability*, vol. 11, n.º 13, p. 3533, jun. 2019, doi: 10.3390/su11133533.
- [22] P. Zarta Ávila, «La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad», *Tabula Rasa*, n.º 28, pp. 409-423, ene. 2018, doi: 10.25058/20112742.n28.18.
- [23] A. Siddiqua, J. N. Hahladakis, y W. A. K. A. Al-Attiya, «An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n.º 39, pp. 58514-58536, ago. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-21578-z.
- [24] M. Anjum, M. Anees, S. Qadeer, A. Khalid, R. Kumar, y Mohamed. A. Barakat, «A Recent Progress in the Leachate Pretreatment Methods Coupled with Anaerobic Digestion for Enhanced Biogas Production: Feasibility, Trends, and Techno-Economic Evaluation», *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 24, n.º 1, p. 763, ene. 2023, doi: 10.3390/ijms24010763.
- [25] H. Sudibyo, Z. L. Shabrina, L. Halim, y W. Budhijanto, «Mathematical Modelling and Statistical Approach to Assess the Performance of Anaerobic Fixed Bed Reactor for Biogas Production from Piyungan Sanitary Landfill Leachate», *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 256-262, may 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.311.
- [26] M. Gao *et al.*, «Aged landfill leachate enhances anaerobic digestion of waste activated sludge», *J. Environ. Manage.*, vol. 293, p. 112853, sep. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112853.
- [27] L. Lindamulla, N. Nanayakkara, M. Othman, S. Jinadasa, G. Herath, y V. Jegatheesan, «Municipal Solid Waste Landfill Leachate Characteristics and Their Treatment Options in Tropical Countries», *Curr. Pollut. Rep.*, vol. 8, n.º 3, pp. 273-287, jun. 2022, doi: 10.1007/s40726-022-00222-x.
- [28] R. Ghasemzadeh, M. A. Abdoli, O. Bozorg-Haddad, y M. Pazoki, «Optimizing the effect of hydrochar on anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste for biogas and methane production», *J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 20, n.º 1, pp. 29-39, jun. 2022, doi: 10.1007/s40201-021-00751-5.

- 
- [29] A. Neri, B. Bernardi, G. Zimbalatti, y S. Benalia, «An Overview of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Food Waste for Biomethane Production», *Energies*, vol. 16, n.º 19, p. 6851, sep. 2023, doi: 10.3390/en16196851.
- [30] T. Zhang *et al.*, «Comparative study on bio-hydrogen production from corn stover: Photo-fermentation, dark-fermentation and dark-photo co-fermentation», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n.º 6, pp. 3807-3814, feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.170.
- [31] F. Boshagh y K. Rostami, «A review of measurement methods of biological hydrogen», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n.º 46, pp. 24424-24452, sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.079.
- [32] Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y R. A. Parra Huertas, «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria», *Prod. Limpia*, vol. 10, n.º 2, pp. 142-159, 2015, doi: 10.22507/pml.v10n2a13.
- [33] S. A. A. Rawoof, P. S. Kumar, D.-V. N. Vo, y S. Subramanian, «Sequential production of hydrogen and methane by anaerobic digestion of organic wastes: a review», *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, n.º 2, pp. 1043-1063, abr. 2021, doi: 10.1007/s10311-020-01122-6.
- [34] G. K. Selormey, B. Barnes, F. Kemausuor, y L. Darkwah, «A review of anaerobic digestion of slaughterhouse waste: effect of selected operational and environmental parameters on anaerobic biodegradability», *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 20, n.º 4, pp. 1073-1086, dic. 2021, doi: 10.1007/s11157-021-09596-8.
- [35] Q. Cheng *et al.*, «Challenges of anaerobic digestion in China», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, n.º 11, pp. 3685-3696, nov. 2021, doi: 10.1007/s13762-020-03087-z.
- [36] J. S. Triviño Pineda, C. Y. Reyes, y J. E. Sánchez Ramírez, «Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática», *Ing. Región*, vol. 25, pp. 60-74, may 2021, doi: 10.25054/22161325.2783.
- [37] R. J. Patinvoh, R. Millati, I. Sárvári-Horváth, y M. J. Taherzadeh, «Factors influencing volatile fatty acids production from food wastes via anaerobic digestion».
- [38] S. Harirchi *et al.*, «Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review», *Bioengineered*, vol. 13, n.º 3, pp. 6521-6557, mar. 2022, doi: 10.1080/21655979.2022.2035986.
- [39] M. N. Uddin *et al.*, «Prospects of Bioenergy Production From Organic Waste Using Anaerobic Digestion Technology: A Mini Review», *Front. Energy Res.*, vol. 9, p. 627093, feb. 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.627093.
- [40] C. Hurtado Noriega, «Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande», *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geográficas*, vol. 26, n.º 51, p. e25264, jun. 2023, doi: 10.15381/iigeo.v26i51.25264.
- [41] C. Lodato, L. Hamelin, D. Tonini, y T. F. Astrup, «Towards sustainable methane supply from local bioresources: Anaerobic digestion, gasification, and gas upgrading», *Appl. Energy*, vol. 323, p. 119568, oct. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119568.
- [42] L. Wu, W. Wei, L. Song, M. Woźniak-Karczewska, Ł. Chrzanowski, y B.-J. Ni, «Upgrading biogas produced in anaerobic digestion: Biological removal and bioconversion of CO<sub>2</sub> in biogas», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111448, oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111448.
- [43] A. Zappi, R. Hernandez, y W. E. Holmes, «A review of hydrogen production from anaerobic digestion», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, n.º 12, pp. 4075-4090, dic. 2021, doi: 10.1007/s13762-020-03117-w.
- [44] H. He, X. Xin, W. Qiu, D. Li, Z. Liu, y J. Ma, «Waste sludge disintegration, methanogenesis and final disposal via various pretreatments: Comparison of performance

- and effectiveness», *Environ. Sci. Ecotechnology*, vol. 8, p. 100132, oct. 2021, doi: 10.1016/j.ese.2021.100132.
- [45] X. Kang, Y. Liu, W. Liu, L. Wang, y C. Li, «Fermentation and Biogas Production of Alkaline Wasted Sludge Enhanced in a Bioelectrolysis-Assisted Anaerobic Digestion Reactor under Increasing Organic Loads», *Sustainability*, vol. 15, n.º 2, p. 1443, ene. 2023, doi: 10.3390/su15021443.
- [46] M. Hernández-Sarabia, J. Sierra-Silva, L. Delgadillo-Mirquez, J. Ávila-Navarro, y L. Carranza, «The Potential of the Biodigester as a Useful Tool in Coffee Farms», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 15, p. 6884, jul. 2021, doi: 10.3390/app11156884.
- [47] Z. An, X. Li, Z. Shi, B. J. Williams, R. M. Harrison, y J. Jiang, «Frontier review on comprehensive two-dimensional gas chromatography for measuring organic aerosol», *J. Hazard. Mater. Lett.*, vol. 2, p. 100013, nov. 2021, doi: 10.1016/j.hazl.2021.100013.
- [48] H. I. Romero, C. Vega, V. Feijóo, D. Villacreses, y C. Sarmiento, «Methane production through anaerobic co-digestion of tropical fruit biomass and urban solid waste», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 351-357, dic. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.170.
- [49] P. F. González, M. J. Presno, y M. Landajo, «Tracking the change in Spanish greenhouse gas emissions through an LMDI decomposition model: A global and sectoral approach», *J. Environ. Sci.*, vol. 139, pp. 114-122, may 2024, doi: 10.1016/j.jes.2022.08.027.
- [50] M. Montes, «Sustainable development economy and the development of green economy in the European Union», *Energy Sustain. Soc.*, vol. 13, n.º 1, p. 32, ago. 2023, doi: 10.1186/s13705-023-00410-7.
- [51] J. Romero-Luis, A. Carbonell-Alcocer, M. Gertrudix, y M. D. C. Gertrudis Casado, «What is the maturity level of circular economy and bioenergy research addressed from education and communication? A systematic literature review and epistemological perspectives», *J. Clean. Prod.*, vol. 322, p. 129007, nov. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129007.
- [52] P. Sefeedpari, R. Pudelko, A. Jędrejek, M. Kozak, y M. Borzęcka, «To What Extent Is Manure Produced, Distributed, and Potentially Available for Bioenergy? A Step toward Stimulating Circular Bio-Economy in Poland», *Energies*, vol. 13, n.º 23, p. 6266, nov. 2020, doi: 10.3390/en13236266.
- [53] Y. Wang, D. Wang, L. Yu, y J. Mao, «What really influences the development of renewable energy? A systematic review and meta-analysis», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 22, pp. 62213-62236, mar. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26286-w.
- [54] J. E. Pérez Islas y T. L. Fernández-Cortés, «Uso del biogás en la gastronomía sostenible», *Bol. Científico Las Cienc. Económico Adm. ICEA*, vol. 12, n.º 23, pp. 45-47, dic. 2023, doi: 10.29057/icea.v12i23.11894.
- [55] L. L. Bridgewater *et al.*, Eds., *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- [56] J. Izquierdo Bautista y J. J. Arévalo Hernández, «Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación», *Ing. Región*, vol. 26, pp. 20-28, dic. 2021, doi: 10.25054/22161325.2527.
- [57] P. Berenjkari, M. Islam, y Q. Yuan, «Co-treatment of sewage sludge and mature landfill leachate by anaerobic digestion», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n.º 5, pp. 2465-2474, may 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1889-2.
- [58] H. Romero Bonilla, C. Vega, V. Feijóo, D. Villacreses, F. Pesantez, y L. Olivera, «Methane gas generation through the anaerobian codigestion of urban solid waste and biomass», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 430-436, dic. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.217.
- [59] L. Appels, J. Baeyens, J. Degreè, y R. Dewil, «Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, n.º 6, pp. 755-781, dic. 2008, doi: 10.1016/j.peccs.2008.06.002.

- [60] J. X. Li, L. A. Wang, L. Wang, X. Y. Zhan, y C. Huang, «Exploring the biogas production and microbial community from co-digestion of sewage sludge with municipal solid waste incineration fresh leachate», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, n.º 4, pp. 901-912, abr. 2021, doi: 10.1007/s13762-020-02884-w.



## ANEXOS

### Anexo A. Biorreactores anaerobios (R1, R2, R3)



### Anexo B. Recolección de lodos de aguas residuales urbanas en el estero "El Macho"



*Anexo C. Toma de muestra lixiviado de relleno sanitario "Ceibales"*



*Anexo D. Caracterización fisicoquímica de lixiviado de relleno sanitario en el laboratorio de "Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía" de la UTMACH*





Anexo E. Caracterización fisicoquímica de lodos de aguas residuales urbanas en el laboratorio de "Aplicaciones Electroanalíticas y Bioenergía" de la UTMACH.



Anexo F. Inyección de la muestra de biogás en el cromatógrafo de gases.



Anexo G. Medición de la pureza de  $\text{CH}_4$  en el cromatógrafo de gases

