



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

“ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE
(UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS
UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA”

PLAN DE TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN ENERGÍAS RENOVABLES

AUTORA: EDDA MARISELA VÉLEZ MEZA

DIRECTOR: ING. JORGE EDWIN GRANJA RUALES

IBARRA -ECUADOR

MAYO 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**“ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE
(UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS
UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA”**

Trabado de titulación revisada por el Comité Asesor, previa a la obtención del
Título de:

INGENIERA EN ENERGÍAS RENOVABLES

APROBADA:

Ing. Jorge Granja

DIRECTOR

FIRMA

Ing. Santiago Zárate MSc

ASESOR

FIRMA

Ing. Santiago Cabrera MSc.

ASESOR

FIRMA

IBARRA -ECUADOR

MAYO 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	171961460-2		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vélez Meza Edda Marisela		
DIRECCIÓN:	Calle Juana Atabalipa y Cap. Espinoza de los Monteros		
EMAIL:	emvelezm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062652930	TELÉFONO MÓVIL:	0985551954

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA
AUTORA:	Vélez Meza Edda Marisela
FECHA:	19 de mayo de 2020
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera en Energías Renovables
DIRECTOR:	Ing. Jorge Edwin Granja Ruales

2. CONSTANCIA

La autora manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es titular de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 26 días del mes de mayo de 2020

LA AUTORA



Nombre: Vélez Meza Edda Marisela

C.I.: 171961460-2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, VÉLEZ MEZA EDDA MARISELA, con cédula de identidad Nro. 1002560883, manifiesto la voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, Artículo 4, 5 y 6, en calidad de autora de la obra de trabajo denominada **ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA**, que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniera en Energías Renovables en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autora me reservo el derecho moral de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 26 días del mes de mayo de 2020



Vélez Meza Edda Marisela

C.I.: 171961460-2

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA – UTN

Fecha: Ibarra, 19 de mayo de 2020

EDDA MARISELA VÉLEZ MEZA

ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA

TRABAJO DE GRADO

Ingeniera en Energías Renovables, Universidad Técnica del Norte, Carrera de Ingeniería en Energía Renovables, Ibarra, 19 de mayo de 2020.

DIRECTOR: Ing. Jorge Granja

El objetivo de esta investigación determinó la geometría del reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agro productivas en Imbabura.

Ibarra, 26 de mayo de 2020

AUTORA



Vélez Meza Edda Marisela

DIRECTOR



Ing. Jorge Edwin Granja Ruales

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

Ibarra, 26 de mayo de 2020

Ing. Jorge Granja

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Certifica

Que, el proyecto de tesis de grado titulado “ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA”, ha sido realizado en su totalidad por la estudiante Vélez Meza Edda Marisela, para la obtención del título de Ingeniera en Energías Renovables. Luego de ser revisada, considerando que se encuentra incluido y cumple con las exigencias y requisitos académicos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, autorizando su presentación para los fines legales pertinentes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. GRANJA', is written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and includes a vertical line extending upwards from the start of the horizontal line.

Ing. Jorge Edwin Granja Ruales

C.I.: 1001143757

PRESENTACIÓN

Yo, Vélez Meza Edda Marisela, en calidad de autora de la obra de trabajo denominada “ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA”, asumo la responsabilidad respecto a los resultados, discusión, conclusiones y demás parte de la investigación; presentando este documento como fuente de apoyo para estudios relacionados a la bioenergía.



Vélez Meza Edda Marisela
C.I.: 171961460-2

AGRADECIMIENTO

“Siempre hay que encontrar el tiempo para agradecer a las personas que hacen una diferencia en nuestras vidas”. J. F. Kennedy

Al haber finalizado este trabajo, quiero expresar mi profundo y sincero agradecimiento a todos quienes hicieron posible cristalizar este sueño.

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte, representada por sus autoridades y todos quienes forman parte de ella, por haberme abierto las puertas para formarme profesionalmente y contribuir proactivamente a la transformación de la sociedad.

A la Carrera de Energías Renovables y Recursos Naturales Renovables, representada por sus directivos, maestros y apreciados compañeros, por el apoyo y dirección permanente para culminar este trabajo de investigación.

Deseo expresar especial gratitud a mi Director Ing. Granja por su esmerada dedicación, guía y predisposición personal y profesional en cada una de las etapas del presente estudio. Así mismo, a mis Asesores Ing. Santiago Zárate e Ing. Santiago Cabrera por sus efectivos consejos y apoyo continuo para lograr culminar con éxito esta meta.

Finalmente, a mi familia por su apoyo incondicional y motivación permanente para concluir esta obra.

Edda Marisela Vélez Meza

DEDICATORIA

“Los desafíos son los que hacen la vida interesante, y superarlos es lo que hace la vida significativa”. J. J. Marino

Este trabajo simboliza el esfuerzo, dedicación y compromiso en cada uno de los momentos transcurridos para conseguirlos. Quiero dedicar este trabajo con profundo cariño a mi familia, maestros y amigos.

A mis padres y hermanos, de quienes he aprendido a luchar incansablemente para conquistar los objetivos y son el motor fundamental que me impulsa a ser una persona íntegra en lo personal y profesional. Gracias por la mejor herencia que un hijo puede recibir, la formación con principios y valores.

A mis apreciados maestros y amigos, quienes han acompañado este proceso de formación. Gracias por su amistad, tiempo y guía permanente a lo largo de la carrera.

Edda Marisela Vélez Meza

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Revisión de antecedentes.....	1
1.2 Problema de investigación y justificación.....	4
1.3 Objetivos	7
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	7
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	7
1.4 Pregunta directriz	7
CAPÍTULO II	8
REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 Marco teórico referencial	8
2.1.1 Digestión anaeróbica en el sector agropecuario.....	8
2.1.2 Reactor anaeróbico de flujo ascendente UASB	18
2.2 Marco legal.....	23
CAPÍTULO III	25
METODOLOGÍA	25
3.1 Descripción del área de estudio.....	25
3.2 Métodos	26
3.2.1 Fase 1: Construcción de dos reactores UASB	28
3.2.2 Fase 2: Análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor	32
3.2.3 Fase 3: Propuesta de criterios de diseño del reactor UASB para aprovechamiento energético.....	34
3.3 Materiales y equipos.....	34
CAPÍTULO IV	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Construcción de dos reactores UASB con distintas dimensiones	36

4.2 Análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor.....	40
4.3 Propuesta de criterios de diseño del reactor UASB para aprovechamiento energético	46
CAPÍTULO V	49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Recomendaciones	50
REFERENCIAS	51
ANEXOS	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales y equipos	35
Tabla 2. Características geométricas de reactores UASB	36
Tabla 3. Características del sustrato de operación	38
Tabla 4. Características del sistema de homogenización del sustrato.....	38
Tabla 5. Características cuantificación de biogás	39
Tabla 6. Medición histórica de temperatura.....	41
Tabla 7. Medición histórica de pH.....	43
Tabla 8. Medición histórica de biogás	44
Tabla 9. Resultados T-test.....	45
Tabla 10. Propuestas de criterio: características geométricas	46
Tabla 11. Propuestas de criterio: características de operación.....	47
Tabla 12. Propuestas de criterio: desempeño del proceso anaeróbico	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad mundial instalada de bioenergía	1
Figura 2. Densidad de residuos pecuarios Ecuador	3
Figura 3. Densidad de residuos pecuarios Imbabura	4
Figura 4. Etapas de la fermentación metanogénica.....	10
Figura 5. a) y b) Estratificación del sustrato-mezcla no homogénea, c) Mezcla homogénea reactor UASB	14
Figura 6. Medición de metano por botella de Mariotte.....	17
Figura 7. Control de volumen de biogás por desplazamiento de fluidos.....	18
Figura 8. Esquema Básico de un reactor UASB	19
Figura 9. Área de estudio	25
Figura 10. Área de estudio, obtención de sustrato	26
Figura 11. Estructura de metodología STOWA.....	27
Figura 12. Configuración geométrica de reactores UASB	29
Figura 13. Sustrato de experimentación.....	29
Figura 14. Bomba manual de diafragma para homogenizar sustrato.....	30
Figura 15. Características de operación, a) Carga del sustrato, y b) Descarga....	31
Figura 16. Ingreso de materia orgánica, a) Sustrato calentado, b) Sustrato cernido, c) Residuo sustrato cernido, d) Ingreso de sustrato al reactor UASB	31
Figura 17. Mediciones variables críticas, a) Toma de muestras, b) Medición pH y temperatura.....	32
Figura 18. Medición de biogás por desplazamiento de fluidos.....	33
Figura 19. Análisis adimensional de los reactores UASB	37
Figura 20. Temperatura histórica del sustrato en reactores UASB.....	40
Figura 22. pH histórico del sustrato en reactores UASB	42
Figura 23. Producción histórica biogás R1 y R2	44

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TRABAJO DE TITULACIÓN

“ANÁLISIS DEL REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) PARA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN PEQUEÑAS UNIDADES AGROPRODUCTIVAS EN IMBABURA”

Nombre de la estudiante: Vélez Meza Edda Marisela
Correo: emvelezm@utn.edu.ec

RESUMEN

Ecuador posee un enorme potencial de recursos naturales con fuentes de energía limpia y renovable, debido a su naturaleza agrícola, la biomasa residual constituye una fuente renovable de energía con un alto potencial de aprovechamiento. No obstante, la sostenibilidad en la mayoría de los casos no es una práctica vigente, ello se evidencia en sistemas ineficientes de manejo de residuos agro residuales por ausencia o inadecuado uso de tecnologías de aprovechamiento. El presente estudio se basa en la “Evaluación de la geometría del reactor anaeróbico de flujo ascendente para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agro productivas en Imbabura”, por ser este un reactor óptimo por sus características operacionales, producción de biogás y bajo costo. Tiene como objetivos: -Construir dos reactores UASB con distintas dimensiones. -Analizar el rendimiento del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor. -Proponer criterios de diseño óptimo de reactores UASB para aprovechamiento energético. Los resultados fueron: reactor con diseño de columna cilíndrica de vidrio acrílico para los dos reactores R1 y R2. Las condiciones experimentales fueron las mismas: pH, temperatura, sustrato, tiempo de retención. Para el análisis de desempeño del proceso anaeróbico se compararon el pH, temperatura y producción de biogás en los dos modelos. La propuesta de criterios de diseño del reactor consideró: configuración geométrica del reactor, homogenización hidráulica, desempeño del proceso anaeróbico, uso en pequeñas unidades agroproductivas y beneficios técnicos, económicos y ambientales. Como conclusión R2 presentó una óptima relación diámetro-altura y desempeño en función de las variables críticas del proceso anaerobio y producción de biogás.

Palabras clave: Reacción anaeróbica, reactor anaeróbico, reactor UASB, sustrato, biogás.

ABSTRACT

“ANALYSIS OF UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET DIGESTION (UASB) FOR ENERGY USE ON SMALL AGRICULTURAL PRODUCTION UNITS IN IMBABURA PROVINCE”

Author: Vélez Meza Edda Marisela

Email: emvelezm@utn.edu.ec

Ecuador has an enormous potential of renewable energy with clean and natural resources. For its agricultural nature, residual biomass makes up a renewable energy source with a potential use. However, sustainability is not a current practice, this is evidenced in inefficient management of agricultural waste due to the absence of harvesting technologies. This study is based on the "Evaluation of the geometry of the anaerobic upflow reactor for energy use in small agricultural production units in Imbabura Province", as this is an optimal reactor because of its operational characteristics, biogas production and low cost. The specific objectives: -Build two UASB reactors with different dimensions. -Analyze the performance of the anaerobic process in the two reactor models. -Propose optimal design criteria for UASB reactors for energy use. The results were: reactor with a cylindrical acrylic glass column design for the two reactors known as R1 and R2. The experimental conditions were the same: pH, temperature, substrate, retention time. For the anaerobic process performance analysis, the pH, temperature and biogas production were compared in the two models. The proposed design criteria for the considered reactor: geometric configuration of the reactor, hydraulic homogenization, performance of the anaerobic process, use in small agricultural-production units and technical, economic and environmental benefits. In conclusion, R2 presented better performance based on the critical variables of the anaerobic process and biogas production.

Keywords: Anaerobic reaction, anaerobic reactor, UASB reactor, substrate, biogas

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el presente apartado se muestra el problema de investigación, justificación y objetivos propuestos. Además, se hace una revisión de la línea base de la problemática en estudio en el contexto mundial, nacional y local.

1.1 Revisión de antecedentes

De acuerdo con las últimas previsiones del mercado de International Energy Agency (IEA, 2018) la bioenergía moderna tendrá el mayor crecimiento en recursos renovables entre 2018 y 2023, así los combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, representarán el 30% del crecimiento del consumo de renovables en este período. Se estima un uso considerable para el sector calor y transporte, que representan el 80% del consumo final total de energía, en relación con otras energías renovables. La capacidad instalada mundial de esta fuente (biomasa sólida, biogás y biocombustibles líquidos) para el año 2007 fue de 50.546 MW y en el 2017 alcanzó 108.958 MW distribuidos en: biomasa sólida 89.635 MW, biogás 17.003 MW y biocombustibles líquidos 2.320 MW como se muestra en la Figura 1 (IRENA, 2018).

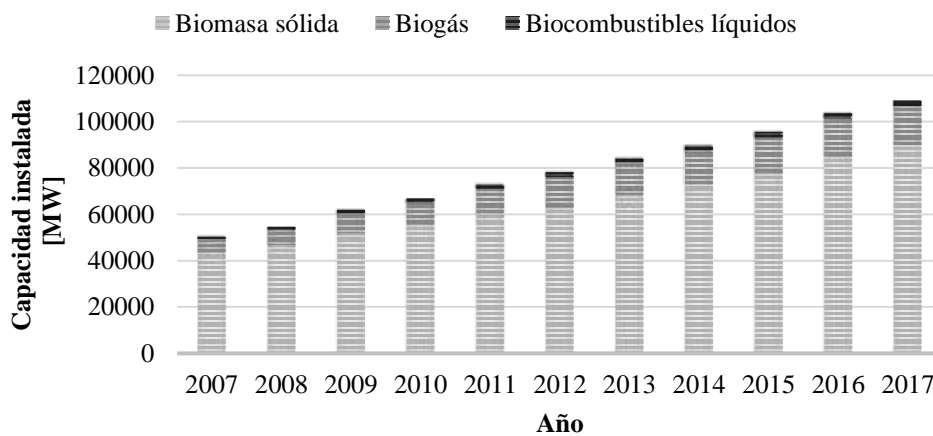


Figura 1. Capacidad mundial instalada de bioenergía

Fuente: IRENA (2018)

INER (2016) afirma que el uso de biogás alrededor del mundo como fuente de energía se ha producido principalmente por el uso de biodigestores en el sector rural. También existen biodigestores industriales y algunos instalados en ciudades encontrados en América Latina y el Caribe, como Brasil, seguido por Cuba y Guatemala. IRENA (2016) sostiene que, desde un punto de vista ambiental, los digestores pueden tratar 8.500 toneladas de estiércol y evitar la emisión de 2.200 toneladas de CO₂ equivalente al año, como alternativa a la leña tradicional y el queroseno, esto supone, un ahorro neto de una planta de biogás de tamaño promedio de 4,6 toneladas de CO₂ equivalente al año.

El Banco Mundial, a través de la Iniciativa de Carbono para el Desarrollo (Ci-Dev), financia importantes proyectos para llevar energía más limpia, segura y asequible a los hogares rurales, dotando de biodigestores para generación de biogás a partir de residuos pecuarios (World Bank, 2017). IRENA (2017) afirma que, aproximadamente 50 millones de sistemas de biogás, se están utilizando a nivel mundial para cocinar, sobre todo en Asia y especialmente en China e India. En los países en desarrollo medir esta tecnología se complica porque los biodigestores a menudo son de origen local y el biogás resultante, raramente es medido.

En el contexto nacional, el Atlas Bioenergético del Ecuador (INER, 2014) en su tabla resumen de residuos pecuarios nacional (Figura 2), consideró los parámetros: cantidad de animales (cabezas/año), la cantidad de residuos resultantes en toneladas anuales (t/año), la densidad de residuos en toneladas anuales por kilómetro cuadrado (t/km²/ año) y la estimación de metano generable asociada en metros cúbicos anuales (m³/ año) para cada cantón. Los potenciales residuos en relación con la densidad (t/km²/ año) destacan: avícola 48,46%, vacuno leche 47,47%, porcino 3,91% y vacuno carne 0,16%.

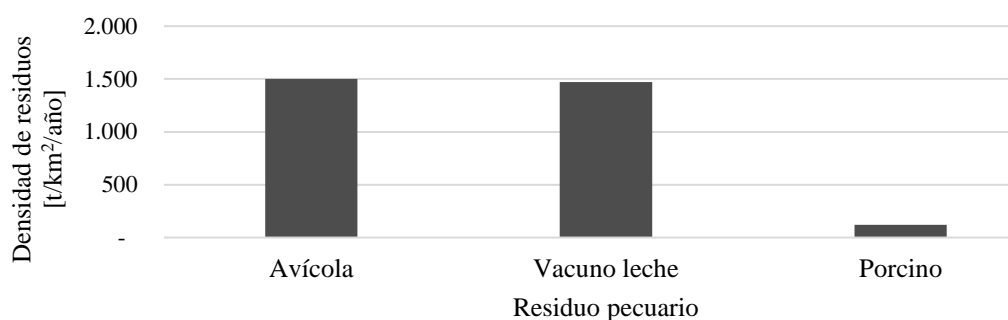


Figura 2. Densidad de residuos pecuarios Ecuador

Fuente: MEER (2014)

El proceso de transformación recomendado para estos residuos (biomasa seca y húmeda) es la digestión anaeróbica, que se produce a partir de residuos orgánicos húmedos sometidos a fermentación. Los productos resultantes son: biogás (gaseoso), biol (líquido) y biosol (sólido) mediante la acción de bacterias o microorganismos específicos (MEER, 2014). En Ecuador, la instalación de los primeros biodigestores tubulares familiares fue en el valle de Intag (Imbabura) por parte de la Asociación de Campesinos Agroecológicos de Intag (ACAI) en 2002. En la actualidad se siguen instalando, habiendo acumulado más de 80 sistemas en varias provincias del país (Peláez y Espinoza, 2015).

La tecnología de los biodigestores está entrando en la agenda del país desde el ámbito estatal, investigación, desarrollo y a través del surgimiento de proveedores de tecnologías de digestión anaerobia, con cuatro ministerios involucrados: MEER, MAE, MAGAP y MIPRO (Peláez y Espinoza, 2015). En el contexto local, con base en el Atlas Bioenergético del Ecuador (2014), en su tabla resumen de residuos pecuarios para la provincia de Imbabura (Figura 3), se establecen de acuerdo con la densidad (t/km²/ año): avícola 66,50%, vacuno leche 31,80% y porcino 1,70%.

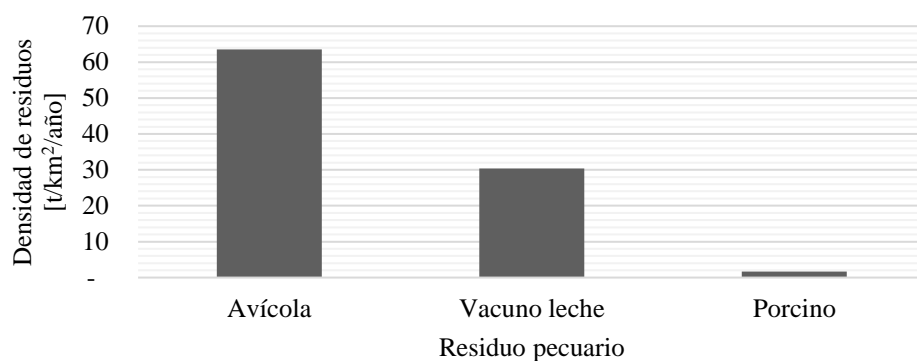


Figura 3. Densidad de residuos pecuarios Imbabura
Fuente: MEER (2014)

1.2 Problema de investigación y justificación

El Ecuador posee un enorme potencial de recursos naturales con fuentes de energía limpia y renovable para la producción de energía eléctrica, entre los que se destacan los recursos hídricos, solares, eólicos, geotérmicos y de biomasa (ARCONEL, 2015). Debido a su naturaleza agrícola, la biomasa residual constituye una fuente renovable de energía con un alto potencial de aprovechamiento (INER, 2014). No obstante, en el territorio ecuatoriano la sostenibilidad no es una práctica vigente, esto se debe a que la sociedad no dispone de las mismas posibilidades educativas, culturales, y económicas, influyendo además el espacio geográfico donde se desenvuelve el colectivo (Cajamarca, Paredes, Guananga y Guevara, 2018).

Lozada (2013) manifiesta que, en Ecuador, así como en países en vías de desarrollo se ha incrementado la explotación animal de manera industrial, principalmente la avícola, porcicultura y cunicultura. Esto conlleva, la producción de deyecciones en altas cantidades, que si no son tratadas adecuadamente puede causar efectos negativos como la degradación ambiental, proliferación de moscas, transmisión de enfermedades, perjudicando la salud humana y animal. Las emisiones del sector ganadero tienen su origen en cuatro procesos: fermentación entérica, gestión del estiércol, producción de los piensos y consumo de energía (FAO, 2018).

Según MAE (2016) el 43,43% y el 2,34% de emisiones del sector agrícola corresponden a GEI por fermentación entérica y mal manejo de estiércol

respectivamente. Paredes (2018) sostiene que, la ausencia de estrategias para el manejo de residuos como el estiércol, han contribuido a la formación de sistemas de producción escasamente competitivos económica y ambientalmente, por lo que, es urgente la implementación de sistemas sostenibles para el manejo de residuos, evitando a la par las afectaciones al ambiente.

En el contexto local, INEC (2016) manifiesta datos agropecuarios importantes para la provincia: el porcentaje de participación en la superficie de labor agropecuaria es del 2% a nivel nacional, la producción anual de caña de azúcar para azúcar representa el 2,95 % respecto a la producción nacional de este cultivo. La producción anual de papa representa el 2,25 %, el ganado vacuno lidera el sector pecuario, existiendo el 2,36 % del total nacional. En consecuencia, es urgente implementar acciones para hacer frente a las emisiones de GEI, como sistemas de manejo de residuo pecuario y agro residuales para fines energéticos y prácticas agroecológicas sustentables.

Actualmente existe el reto de hacer coexistir la agroenergía, seguridad alimentaria y la protección del ambiente, ante el cambio climático, la degradación ambiental y la crisis alimentaria (Suárez *et al.* 2017). En este marco, una alternativa práctica, económica y eficiente que permite dar un adecuado manejo a los residuos orgánicos contaminantes e incorporarlos al suelo, lo constituye el proceso de biodigestión anaerobia, que brinda impactos positivos al ambiente, además múltiples beneficios socioeconómicos y culturales (Quintero, Gámez y Lozano, 2018).

Justificación

La presente investigación se justifica por estar alineada a las políticas internacionales y nacionales que plantean soluciones efectivas para enfrentar la crisis ambiental generada por emisiones de GEI a la atmósfera. Numerosos estudios como (FAO, 2018; MAE, 2016 y Paredes, 2018) señalan al sector ganadero como uno de los principales en la emisión de estos gases, resultado de la cadena productiva de esta actividad. Uno de los procesos claves, es el manejo de residuos

pecuarios y agro residuales, que debe llevarse adecuadamente para mitigar esta problemática.

En este contexto, IEA (2018), INER (2016) e IRENA (2017) han realizado amplios estudios para dar solución a este fenómeno, en busca de alternativas para tratar estos residuos y darles un valor agregado en el ámbito bioenergético y agrícola. Así, se propone la implementación de tecnologías para descomposición anaerobia mediante reactores UASB que procesen los residuos orgánicos generados con una doble intención, por un lado, favorecer el reciclaje de nutrientes y devolverlos nuevamente al suelo (bioabonos, bioles) y por otro, satisfacer las demandas energéticas *in situ* (biogás).

Esta solución se plantea particularmente como una buena práctica agroecológica sustentable en sectores rurales para generación de biogás, que permita satisfacer en buena parte las demandas energéticas, relacionadas con las actividades pecuarias, a fin de reutilizar los residuos producidos como energía y fertilizante natural para el suelo. Por consiguiente, el presente estudio se caracteriza por su relevancia, originalidad, innovación e impacto educativo, social y ambiental, se reconoce la importancia de la bioenergía aplicada al agro.

Este trabajo investigativo generará impactos positivos en el campo de la investigación, como un aporte valioso para futuros estudios relacionadas a la bioenergía. Cabe destacar que el presente proyecto aporta a la línea de investigación de la UTN: “Biotecnología, energía y recursos naturales renovables” y se encuentra dentro del proyecto de investigación “Tratamiento de aguas residuales domesticas mediante tecnología de lodos granulares aerobios”.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Analizar la geometría del reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agro productivas en Imbabura.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Construir dos reactores UASB con distintas dimensiones.
- Analizar el rendimiento del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor.
- Proponer criterios de diseño óptimo de reactores UASB para aprovechamiento energético.

1.4 Pregunta directriz

¿Por qué es importante el análisis del reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agro productivas en Imbabura?

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se propone sentar las bases teórico-conceptuales que sustentan el presente estudio. Se tomó referencias para la revisión de literatura de investigaciones, artículos científicos y estudios relacionados al aprovechamiento energético mediante tecnología anaeróbica. Se presentan un conjunto de aportes científicos en relación con las variables de investigación.

2.1 Marco teórico referencial

A continuación, se abordan los aspectos conceptuales más relevantes de la investigación, y que permitirán explicar los resultados.

2.1.1 Digestión anaeróbica en el sector agropecuario

La digestión anaeróbica consiste en un proceso biológico que ocurre en la ausencia de oxígeno, donde la materia orgánica compleja se descompone por la acción de varios grupos de microorganismos, dando como productos finales un biogás y digerido (Moreno, Moral, García, Pascual y Bernal, 2016). El biogás es una mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), su composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí (Lorenzo y Obaya, 2005).

Sin duda, desde tiempos antiguos una actividad ligada a la agricultura es la gestión de las deyecciones ganaderas, los posibles impactos o beneficios ambientales que comporta su control afectan a la atmósfera, al suelo y las aguas. Sólo un conocimiento actualizado de estos puede permitir valorar el beneficio de cambios de actitudes y de la adopción de medidas simples de actuación (Chiva, Berlanga, Martínez y Climent, 2018). En este sentido, la digestión anaerobia juega un papel

preponderante para el aprovechamiento de recursos agro residuales y pecuarios no sólo por los beneficios presentados sino también por el valor energético que aporta

La digestión anaerobia combinada de lodos y residuos (codigestión) aplicada con mayor asiduidad al tratamiento de residuos ganaderos es una alternativa que permite maximizar el uso de digestores, actualmente empleados escasamente en la mayoría de los casos. Es oportuno rentabilizar su operación, tanto por el tratamiento de residuos como por la producción asociada de biogás (Mata, Dosta, Romero, Fonoll y Astals, 2014). Esta tecnología constituye una solución viable para reducir el volumen y concentración de materia orgánica de los residuos, mejorando la calidad de los desechos (López, Jiménez, Romero y Dewulf, 2012).

Castells, Flotats y Campos (2012) afirman que, desde la antigüedad en varios países se han promovido pequeñas plantas a escala familiar o local, empleando estiércol vacuno con el objetivo de producir gas para cocción y adicionalmente, obtener un producto fertilizante. Martí (2019) destaca como ventajas del estiércol vacuno con relación al de cerdo, que es un estiércol más equilibrado, presenta mayor cantidad de producción por animal (8 kg de estiércol diario por cada 100 kg de peso vivo), es más fácil recogerlo y contiene una proporción de CH₄ de 45-55%.

2.1.1.1 Etapas de la fermentación metanogénica

La digestión anaeróbica es un proceso de degradación de materia orgánica muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas, que forman un consorcio (Martí, 2019). De hecho, la mayoría de estas reacciones ocurren de forma simultánea, los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas, que tienen que estar en equilibrio entre ellas: 1. Hidrólisis, 2. Etapa fermentativa o acidogénica, 3. Etapa acetogénica y 4. Etapa metanogénica, como se observa en la Figura 4 (FAO, 2011).

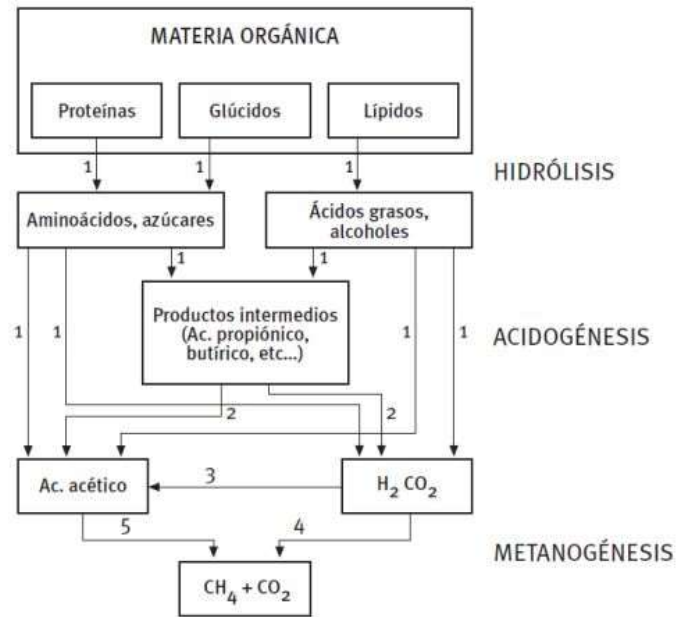


Figura 4. Etapas de la fermentación metanogénica
Fuente: FAO (2011)

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂ (FAO, 2011).

2.1.1.2 Variables críticas del proceso de digestión anaeróbica

Sarabia, Laines, Sosa y Escalante (2017) señalan que, la digestión anaerobia es una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos que no sólo permite dar solución a su manejo, sino que también permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. También, aprovechar (mediante la producción de biogás) el

potencial energético de los residuos y obtener un producto rico en nutrientes, útil como fertilizante.

Una vez escogido el tipo y diseño del reactor es importante evaluar las variables críticas del proceso (pH, temperatura, producción de biogás) como lo sugiere Quipuzco y Baldeón (2011). Las variables críticas del proceso anaeróbico como la temperatura y el pH permiten modificar la dinámica de producción de biogás y afectan significativamente la digestión anaerobia. Otro parámetro importante es la agitación para homogenizar la mezcla (Criollo, Alvarado y Numpaque, 2014; Martí, 2019; Bedoya y Chaparro, 2016; Nuntón, 2019; Quinchía, Pérez, Doria y Sánchez, 2019; Martínez, Numpaque y Alvarado, 2016, Solera del Río, 2014).

– pH

El pH es un indicador de la acidez de una materia orgánica. El consorcio bacteriano que desarrolla la digestión anaerobia prefiere ambientes con pH entre 6,5-7,5. Las bacterias que realizan la etapa de acidogénesis y acetogénesis trabajan mejor en pH 5,5 y 6,5, mientras que, las metanogénicas lo hacen en un rango 7,8 a 8,2 (FAO, 2011). La mayoría de estiércoles tienen valores en ese rango, siendo que el estiércol de cerdo es más ácido (en torno a 6,5) y el de vaca más neutro (en torno a 7). También influye el pH del agua con que se mezcla la materia orgánica, que puede resultar en una alimentación del reactor fuera del rango óptimo de trabajo del consorcio de bacterias (Martí, 2019).

El pH está relacionado esencialmente con la concentración de ácidos grasos volátiles, la alcalinidad y la concentración de amonio (Solera del Río, 2014). Nuntón (2019) señala que si se acumulan demasiados ácidos grasos cae el valor de pH, valores inferiores al rango 6,8 a 7,5 inhiben la acción de las bacterias metanogénicas y con ella la producción de biogás. Criollo et al. (2014) señala que el sistema de estabilización de pH permitió mantener rangos entre 6,5 y 7,5 en el reactor. Bedoya y Chaparro (2016) afirman que la mayor producción de biogás en el reactor en operación, se produjo a pH mayores a 7.

Quinchía et al. (2019) definen al pH como una medida de la concentración de hidrógeno expresado en términos logarítmicos, que afecta directamente a la solubilización de la materia orgánica y la actividad enzimática de los microorganismos que se desarrollan óptimamente en pH entre 6,8 a 7,2, donde se obtiene mayor rendimiento de metano. No obstante, este factor no puede generalizarse, porque está directamente influenciado por el tipo de sustrato utilizado. Pérez, Díaz, De León, Saldaña, Pérez, Guerrero y Sebastian (2018) sostienen que la condición óptima de la digestión anaeróbica para la producción de metano en su estudio fue con un pH de 8,2.

– **Temperatura**

Las bacterias trabajan más rápido cuanto mayor es la temperatura. La temperatura de trabajo del biodigestor define el tiempo que necesitará el consorcio bacteriano para trabajar el estiércol. Cuanta mayor sea la temperatura, menos tiempo necesita el consorcio bacteriano en producir biogás. A este tiempo se le llama tiempo de retención (TR). La temperatura a la que se encuentran el consorcio bacteriano que realiza la digestión anaerobia dentro del biodigestor, es la que determina la temperatura del trabajo del biodigestor (Martí, 2019).

“En el proceso anaeróbico se puede trabajar entre rangos diferentes de temperatura: psicrófilo (5 y 20°C), mesófilo (30 y 40°C) y termófilo (50 a 60°C); independientemente de la temperatura elegida, esta debe ser lo más constante posible” (Solera del Río, 2014, p. 113). FAO (2011), Criollo et al. (2014), Martínez, Numpaque y Alvarado (2016) y Nuntón (2019) señalan que el rango de temperatura para favorecer el proceso de digestión anaeróbica es el mesófilo comprendido entre los 25°C a 40°C. En este escenario, las bacterias descomponen las sustancias provocando que la mayor parte de la materia orgánica se digiera y que el gas generado se purifique y se desulfure (Bedoya y Chaparro, 2016).

Cualquier variación significativa de temperatura se traduce en un desequilibrio del proceso, que genera inhibición en la producción de biogás; por ello es importante mantener la temperatura del proceso estable durante el tiempo en el que se esté desarrollando el experimento (Martínez et al., 2016). Para mantener un proceso estable, la temperatura del sustrato en el interior del reactor debe ser controlada, pues no solo incide en el aspecto cinético (velocidad de consumo del sustrato, velocidad de crecimiento de biomasa) sino también en el aspecto termodinámico (conversión de sustrato a producto) referente a las condiciones de equilibrio que se pueden lograr para una etapa determinada de la digestión anaeróbica (Quinchía et al., 2019).

Solera del Río (2014) señala que “los reactores que operan en rangos mesofílicos son más estables que los que lo hacen en rangos termofílicos” (p. 114). Además, menciona que el efecto de la temperatura sobre el rendimiento de la digestión anaeróbica depende notablemente del tipo de sustrato que alimenta al reactor. Afirma que “se obtuvieron mayores producciones de biogás en el tratamiento anaeróbico termófilo frente al mesófilo en la digestión de purines vacunos, aunque no se aprecian diferencias entre ambos rangos de temperatura” (p. 116).

– **Homogenización de la mezcla**

La eficiencia de los procesos de digestión anaeróbica, particularmente cuando los sustratos contienen elevado contenido de materia sólida, depende en gran medida de las condiciones de mezcla y homogenización que se establecen en los reactores (Solera del Río, 2014; Bedoya y Chaparro, 2016). Afirma que “el residuo debe ponerse en contacto con los microorganismos durante un determinado tiempo de residencia, lo que depende del régimen hidráulico (mezcla) que se establezca en los reactores” (p. 121). La homogenización de la mezcla es proporcional al rendimiento del proceso anaeróbico. Los objetivos principales de la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por bacterias metalogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, uniformar la densidad bacteriana, reducir la

formación de espacios muertos, que minimizan el volumen efectivo del reactor, prevenir la formación de espumas y sedimentación del reactor (Nuntón, 2019).

Contribuye a reducir los materiales orgánicos e inorgánicos sedimentables y homogeniza la temperatura y concentración de la mezcla (Quinchía et al., 2019). Una mezcla óptima favorece la distribución homogénea de las enzimas y microorganismos entre los sustratos, reduce el tamaño de las partículas a medida que progresa la digestión y elimina biogás de la mezcla, mejora la transferencia de calor, diluye sustancias de efecto inhibitorio y previene estratificaciones y formación de sólidos flotantes en la parte superior de los reactores (Solera del Río, 2014). Es importante considerar “factores como el sistema elegido, la intensidad y la duración del mezclado, e incluso la localización de los dispositivos de mezclado” (*op. cit.*, p. 121). En consecuencia, a más de la agitación se debe considerar el tamaño de las partículas del sustrato de alimentación en relación con la configuración geométrica del reactor, a fin de evitar inhibición del proceso, obstrucción de tuberías, formación de costras en la parte superior de la mezcla (Figura 5).

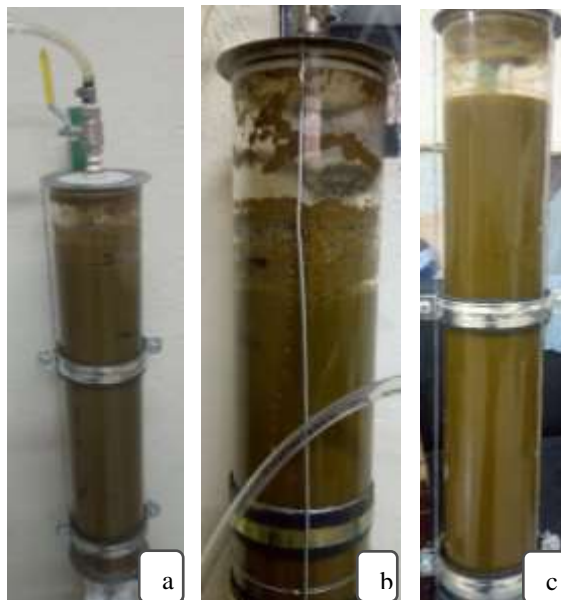


Figura 5. a) y b) Estratificación del sustrato-mezcla no homogénea, c) Mezcla homogénea reactor UASB

Solera del Río (2014) señala que la intensidad del mezclado es un factor crítico de la operación en reactores anaeróbicos. La agitación moderada (media a baja velocidad) es condición óptima para distribuir homogéneamente la alimentación (Quinchía et al., 2019; Solera del Río, 2014). Esta evita espacios muertos y cortocircuitos en el reactor; hacerlo excesivamente puede destruir a los agregados bacterianos o flóculos y generar excesivas fricciones; lo que dificulta las relaciones sintróficas (transferencia de hidrógeno) entre los microorganismos (*op. cit.*). Estos aspectos influyen en el reactor UASB por su configuración de manto de lodos, de ahí la importancia de que el adecuado sistema de agitación coadyuve al proceso anaeróbico y producción de biogás.

– **Sistemas de agitación**

El sistema de agitación se refiere a los mecanismos necesarios para lograr una adecuada homogenización de la mezcla y debe seleccionarse en relación con la configuración del reactor y del tamaño de los sustratos a digerir. Solera del Río (2014) afirma que el mezclado puede ser: mecánicamente mediante dispositivos móviles ubicados en el interior de los digestores, hidráulicamente mediante recirculación del contenido del digestor y neumáticamente por inyección del biogás. Se pueden emplear sistemas mixtos, como la recirculación del efluente del digestor e inyección de biogás.

Cuando se digieren sustratos muy fluidos con bajo contenido de sólidos, el mezclado producido por la introducción de la alimentación, por flujo convectivo térmico o por la agitación provocada por la ascensión de burbujas de biogás producido por el reactor puede ser suficiente (*op. cit.*). El reactor UASB de acuerdo con la literatura ha sido ampliamente usado en plantas de tratamiento, por tanto, al emplear otro sustrato como estiércol vacuno es necesario adoptar un sistema de agitación que optimice el proceso.

Existen sistemas de agitación mecánica, de recirculación del contenido y de inyección de biogás. En los primeros suelen emplearse turbinas o agitadores, se

recomienda aplicar una agitación moderada para evitar perturbar a los microorganismos y consumos energéticos excesivos. Son adecuados para digestores de cubiertas fijas o flotantes. En los sistemas de recirculación del contenido el mezclado se induce por la recirculación del contenido del reactor, emplea bombas de hélice montadas sobre tubos de aspiración dispuestos de forma interna o externa al reactor; o en bombas centrífugas o de flujo axial acopladas externamente a las conducciones asociadas. La frecuencia de agitación de 2 a 5 veces al día depende del tamaño del reactor. Son recomendados en reactores de cubierta fija.

Martínez et al. (2016) sostienen que, en su experimentación en un reactor anaeróbico tipo batch con capacidad de 3 L, emplearon un sistema de agitación compuesto por un motor y una hélice, donde se realizó la agitación cada 8 horas por 5 minutos a 120 rpm. Criollo et al. (2014) señalan que en su experimento con reactor anaeróbico tipo batch con capacidad de 5 L, el sistema de estabilización tuvo como parámetro esencial la agitación del sustrato, ya que pone en contacto la materia orgánica con los microorganismos. Utilizaron dos bombas peristálticas a 5V, con un ciclo útil de 80% y se censo la posición del motor con un encoder rotacional para la dosificación por gotas. Los sistemas de inyección de biogás son adecuados también para reactores de cubiertas fijas o flotantes. Se clasifican en confinados y no confinados, en ambos casos el gas se recoge por la parte superior de los reactores.

2.1.1.3 Cuantificación y caracterización del biogás

Biogás se denomina a la mezcla de gases producida en la digestión anaeróbica y se caracteriza por su composición: 50% a 70% de metano (CH_4), 40% a 20% de dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros gases, entre los que se destaca el ácido sulfhídrico (H_2S). La fuente principal de producción de este combustible son los residuos orgánicos tratados en un reactor anaeróbico, de donde se obtiene dos subproductos asociados: el biogás (combustible) y biol (fertilizante). Este tratamiento de residuos es de gran importancia para fortalecer la resiliencia de los

pequeños y medianos productores, reduciendo las emisiones de GEI y evitando la contaminación de cuerpos de agua (Martí, 2019).

La producción de biogás en pequeñas unidades agroproductivas aumenta la soberanía energética del productor, posibilitando ampliar los usos energéticos en su finca como: cocción, alimentar ordeñadoras mecánicas, bombeo de agua, molinos, cortadoras de pasto, otros usos térmicos o la producción de consumo propio de electricidad. Los reactores domésticos son aquellos capaces de abastecer las necesidades de combustible para cocinar de una familia media, que requeriría de al menos 1000 litros de biogás por día. Considerando que 1 kg de estiércol de vaca tiene el potencial de producir 35 litros de biogás, el reactor debe ser cargado con 25 o 30 kg de estiércol de vaca, que corresponde la cantidad de estiércol depositado en el establo por cuatro vacas que duermen en un establo cerca de la casa (*op. cit*)

Para la cuantificación de biogás existen diversos métodos, Martínez et al. (2016) emplearon la medición de producción de metano por botella de Mariotte, que funciona mediante desplazamiento de líquido. El líquido empleado es una solución concentrada de NaOH o KOH en una concentración de 1 mol/L. A medida que el gas pasa a través de estas soluciones de pH alto (mayor a 12), el (CO₂) del biogás se convierte en carbonato y es absorbido dentro de la solución. Únicamente el gas metano pasa a través de la solución y un volumen equivalente es expulsado a través de la botella de Mariotte, el cual es proporcional al volumen de gas metano que ingresa a la botella (Figura 6).

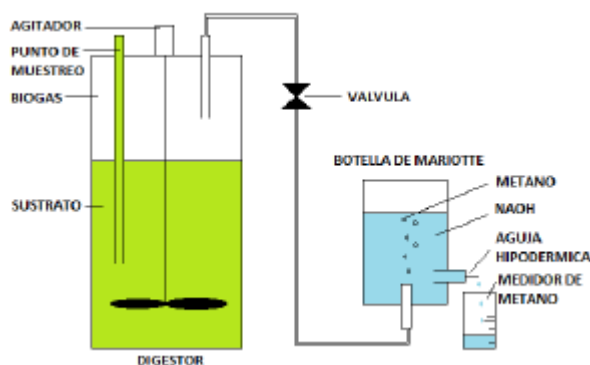


Figura 6. Medición de metano por botella de Mariotte

Fuente: Martínez et al. (2016)

Nuntón (2019) en su estudio, para el control de volumen de biogás acondicionó un método de despliegue, basados en la ley de que dos cuerpos no pueden ocupar el mismo lugar, el gas obtenido desplazaría el agua suministrada en una probeta graduada. El líquido utilizado para medir su desplazamiento es una solución concentrada de NaOH (Figura 7).

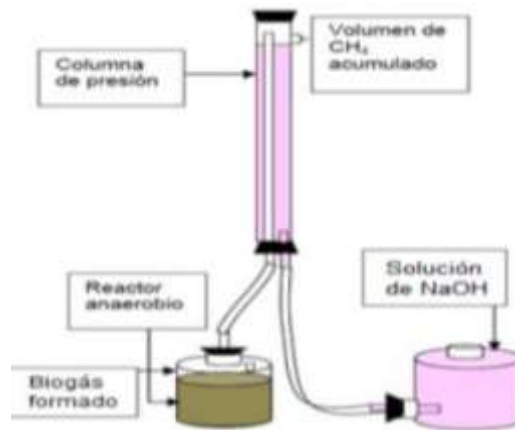


Figura 7. Control de volumen de biogás por desplazamiento de fluidos
Fuente: Nuntón (2019)

La medición de producción de biogás sumado a las variables críticas del proceso: pH, temperatura, cantidad de carga y su preciosidad son controles básicos que permiten tener un seguimiento al reactor, permiten entender cómo funciona el sistema y la eficiencia que tiene, así como prevenir problemas que pudieran estar relacionados con fallas en los equipos o cambios en la alimentación (FAO, 2019)

2.1.2 Reactor anaeróbico de flujo ascendente UASB

El reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) es un reactor multifase compuesto por líquido-lodo-gas, donde sus interacciones determinan su comportamiento hidráulico (Figura 8). La innovación técnica de este tipo de reactores reside en un dispositivo situado en la parte superior del reactor (separador de tres fases- GSS) que permite separar internamente la biomasa, el efluente tratado y el biogás (Borja, 2015). El diseño de un UASB, al igual que los demás sistemas de tratamiento de aguas residuales, se ha centrado fundamentalmente en el proceso bioquímico. Se ha

dejado en segundo plano los aspectos hidrodinámicos como las características de flujo, régimen de mezcla, tiempos de residencia, geometría del reactor, entre otros, lo que presenta una limitante en el diseño (Pérez, Aldana y Rojano, 2016).

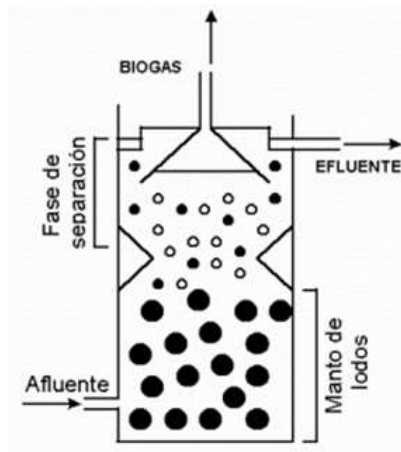


Figura 8. Esquema Básico de un reactor UASB
Fuente: Campos y Flotats (2013)

2.1.2.1 Características de los reactores UASB

Los reactores del tipo UASB son económicos energética y ecológicamente. Entre sus principales ventajas se tiene la producción de metano, se puede usar como fuente de energía y baja producción de biomasa. Esto determina costos reducidos en el manejo del lodo en exceso y capacidad de estabilizar altos volúmenes de efluentes a bajo costo, comparado con procesos aerobios (Pacco, Vela, Miglio, Quipezco, Juscamaita, Álvarez y Fernández, 2018). Campos y Parra (2014) destacan las ventajas del reactor UASB frente a otros tipos de tecnologías como: elevada capacidad de tratamiento incluso para altas cargas orgánicas, bajo tiempo de retención hidráulico, bajo requerimiento energético, producción de biogás, facilidad de construcción y mantenimiento.

En los sistemas anaerobios de flujo ascendente y bajo ciertas condiciones, se puede llegar a observar que las bacterias pueden llegar a agregarse de forma natural formando flóculos y gránulos. Estos densos agregados poseen unas buenas cualidades de sedimentación y no son susceptibles al lavado del sistema bajo

condiciones prácticas del reactor. La retención de fango activo, ya sea en forma granular o floculenta, hace posible la realización de un buen tratamiento incluso a altas tasas de cargas orgánicas. La turbulencia natural causada por el propio caudal del influente y de la producción de biogás provoca el buen contacto entre agua residual y fango biológico en el sistema UASB. En los sistemas UASB pueden aplicarse mayores cargas orgánicas que en los procesos aerobios. Además, se requiere un menor volumen de reacción y de espacio, al mismo tiempo, se produce una gran cantidad de biogás y por tanto de energía (Sánchez, 2015).

Uso en pequeñas unidades agro productivas

Tradicionalmente el reactor UASB ha sido ampliamente utilizado para el tratamiento de aguas residuales (Salazar, Uribe, Gómez y Zafra, 2019; Aranda, 2019; Bermúdez y Rozo, 2018; Allende y Mendoza, 2019; Muñoz, Sánchez, Vera y Párraga, 2018). Sin embargo, autores como Tapia, Vela, Miglio, Quipuzco y Juscamaita (2019), Madueño (2018) y Pacco et al. (2018) señalan estudios con aguas de ganado porcino, lactosuero, entre otros. El presente estudio se constituye en uno de los primeros en experimentar con excretas de ganado vacuno en este tipo de reactor, dada las amplias ventajas que muestra.

Beneficios técnicos, económicos y ambientales

Los sistemas de tratamiento anaerobio tipo UASB se destacan dentro del grupo de procesos convencionales porque han evolucionado en cumplimiento de exigencias ambientales con importantes ventajas técnicas, económicas y sociales sobre otros sistemas de tratamiento anaerobio y aerobio (Salazar et al., 2019). Los beneficios ambientales se orientan a reducir la emisión de gases efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles, manejo adecuado de residuos para reducir la eutrofización (proliferación descontrolada de bacterias), reemplazar los fertilizantes sintéticos, entre otros (Parra, Botero y Botero, 2019).

2.1.2.2 Consideraciones de diseño para un reactor UASB

Dentro de los aspectos a considerar para el diseño de un reactor anaerobio de flujo ascendente se encuentran: la carga orgánica volumétrica, la velocidad de flujo ascendente, el volumen del reactor, las características físicas, como el sistema de distribución del efluente y el sistema de recolección de gas (Márquez y Martínez, 2011).

– Cargas orgánicas volumétricas

Los reactores UASB han logrado eficiencias de remoción de DQO del 90 a 95% se han logrado en cargas que van desde 12 hasta 20 DQO kg/m³ *d en una variedad de desechos de 30 a 35 °C. Los valores tiempo de retención hidráulico para aguas residuales de alta fuerza se han logrado reducir a lapsos de 4 a 8 horas a esas cargas. Se puede utilizar el aumento de las velocidades de flujo ascendente, donde menos del 90% de remoción de DQO y concentraciones de SST mayores de efluentes son aceptables, las cuales desarrollarán un lodo granulado más denso por el lavado de otros sólidos (*op. cit.*).

– Velocidad del flujo ascendente

Esta velocidad del agua debe estar bien regulada, con el fin de evitar el arrastre de gránulos fuera del reactor (Díaz, 2018). Para aguas residuales más débiles, la velocidad permitida y la altura del reactor, determinará el volumen del reactor UASB y para aguas residuales más fuertes, la velocidad será determinada por la carga volumétrica de DQO (Márquez y Martínez, 2011).

– Volumen del reactor y dimensiones

El volumen efectivo de tratamiento es el volumen ocupado por el manto de lodo y de biomasa activa. Deben considerarse la carga orgánica, la velocidad superficial y el volumen efectivo de tratamiento para determinar el volumen requerido del

reactor y sus dimensiones (Márquez y Martínez, 2011). Los reactores UASB pueden tratar volúmenes relativamente altos en menor tiempo. El tamaño del reactor se calcula con relación al volumen del efluente a tratar (Hernández, 2015).

– **Características físicas**

Las principales características físicas que requieren una cuidadosa consideración son: la alimentación de entrada, la separación y recolección de gas (los diseños de separación de entrada y el gas son únicos para el UASB) y la retirada del efluente, para proveer una distribución uniforme y evitar el almacenamiento y formación de zonas muertas. Estos dos aspectos son muy importantes sobre todo cuando se tratan aguas residuales débiles, ya que se puede tener menor producción de gas y mezcla del manto de lodo. Un número de tuberías de alimentación se colocan para dirigir el flujo a diferentes áreas en la parte baja del reactor. El acceso, debe proveer tuberías para la limpieza en caso de taponamiento (Márquez y Martínez, 2011).

– **Recuperación de Gas y separación de sólidos**

Esta estructura trifásica se encarga de separar primero los sólidos suspendidos provenientes del flujo ascendente, mediante unas barreras físicas que detienen los sólidos y hace que se sedimenten nuevamente. Luego se separa la parte gaseosa, ya que el reactor está sellado en la parte superior, donde el gas puede ser captado y finalmente la parte líquida llega a la cima del tanque donde sale como el efluente del sistema (Flores, 2019).

FAO (2011) señala que para que un reactor de residuos orgánicos opere correctamente, debe reunir las siguientes características:

- a) Ser hermético con el fin de evitar la entrada de aire, que interfiere con la digestión anaeróbica e impedir fugas del biogás producido.
- b) Estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, que usualmente se consigue construyéndolos enterrados.
- c) El contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad, aun no siendo el recipiente de alta presión.

- d) Contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema.
- e) Tener acceso para el mantenimiento.
- f) Contar con un medio para romper las natas o costras que se forman.

Es importante identificar el tipo de reactor según su alimentación o carga, que pueden ser: continuos, semicontinuos y discontinuos o régimen estacionario. Son continuos cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente de carga. Utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Semicontinuos cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas, se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó y es usado en sistemas pequeños para uso doméstico. Discontinuos (Batch) se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas y biogás disminuye, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación (*op. cit.*).

2.2 Marco legal

La Constitución de la República del Ecuador, el cuerpo legal de mayor jerarquía, contiene el Artículo 413, de la Sección: Biósfera, Ecología Urbana y Energías Alternativas, del Capítulo II: Biodiversidad y Recursos Naturales. Dispone que desde el Estado se promoverá la eficiencia en el uso de la energía y la implementación de energías renovables y otras tecnologías ambientalmente limpias. El presente estudio, apegado al mencionado cuerpo legal, propicia el uso de tecnologías como reactores para fines energéticos en pequeñas unidades agroproductivas de la provincia.

El objetivo 3 del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021- Toda una Vida: “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones”, propone una gobernanza sostenible de los recursos naturales no renovables, a través del establecimiento de prácticas responsables con el medio ambiente y con la población. Insiste en la inversión pública para consolidar y ampliar la matriz

energética basada en energías renovables y otras no convencionales, con esquemas tarifarios de incentivos al sector privado y asociativo. En consecuencia, este estudio pretende incidir en las buenas prácticas de sostenibilidad en el agro mediante el aprovechamiento energético de los residuos generados (SENPLADES, 2017).

La Regulación CONELEC 004/04 tiene como objetivo el establecimiento de los precios, su período de vigencia y forma de despacho para la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado y sistemas aislados, por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales. La regulación 001/13 establece parámetros para el tratamiento de la participación de generadores de energía eléctrica renovable basados en biomasa, biogás y centrales hidroeléctricas menores a 30 MW, con un periodo preferencial de hasta 15 años (CONELEC, 2013).

La Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (2015) menciona en el Artículo 2, sobre los objetivos específicos de la ley, literal 5: “Desarrollar mecanismos de promoción por parte del Estado, que incentiven el aprovechamiento técnico y económico de recursos energéticos, con énfasis en las fuentes renovables”. El presente estudio destaca la importancia de la evaluación de tecnologías alternativas para satisfacer la demanda energética de unidades agroproductivas a partir de la biomasa agro residual y pecuaria producida.

Cabe señalar en el marco de instrumentos internacionales, a la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), que en el Objetivo 7 señala: “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”. En este sentido, el presente estudio se encuentra alineado a las metas de este objetivo. Promueve la investigación de nuevas iniciativas que aseguren el acceso universal a los servicios de energía modernos, mejorar el rendimiento energético y aumentar el uso de fuentes renovables para crear comunidades más sostenibles e inclusivas y para la resiliencia ante la problemática ambiental.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el área de estudio, así como los materiales y métodos empleados para el desarrollo de la investigación. Además, se refiere los métodos llevados a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados respectivamente.

3.1 Descripción del área de estudio

La investigación se realizó en los predios de la Planta de tratamiento de aguas residuales, que se encuentra el estadio olímpico UTN, ubicada en la parroquia El Sagrario, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, en la Av. 13 de Abril y Morona Santiago a una altitud de 2250 m.s.n.m., 00°- 22' - 44" de latitud N y 78°- 07' - 20" de longitud O. La temperatura promedio de 18 °C, 631,40 mm de precipitación y 72% de humedad relativa (Figura 9) (INHAMI, 2015).



Figura 9. Área de estudio
Fuente: Villareal (2015)

El sustrato residual para experimentación se obtuvo de la Granja Experimental “La Pradera”, ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Antonio Ante, parroquia San José de Chaltura (Figura 10), ubicada a 3,5 km de la ciudad de Atuntaqui, 12 km de la capital provincial y 128 km de la capital ecuatoriana, a una altitud de 2256 m.s.n.m., 00°- 19' - 47" de latitud N y 78°- 07' - 56" de longitud O. La temperatura

promedio de 18 °C, con 631,40 mm de precipitación y 72% de humedad relativa (INHAMI, 2015).

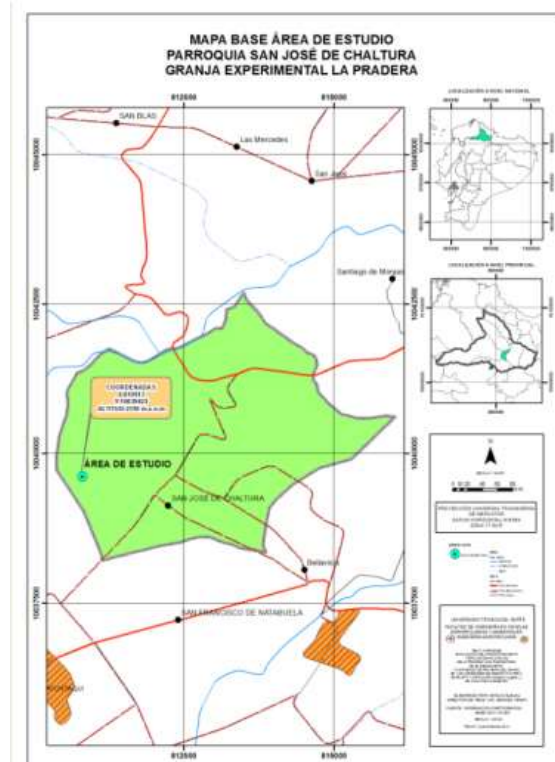


Figura 10. Área de estudio, obtención de sustrato
Fuente: Luna (2014)

3.2 Métodos

En este apartado se presentan detalladamente las técnicas y procedimientos a utilizarse así como la metodología en correspondencia a cada objetivo de investigación. Se asumió el protocolo físico-químico de caracterización propuesto por la Asociación Holandesa de Investigación Aplicada al Agua (STOWA), para describir el proceso y determinar la relación óptima diámetro-altura L/D en función de las condiciones anaeróbicas más favorables para los modelos de reactor UASB. La metodología consta de 9 pasos (Figura 11).

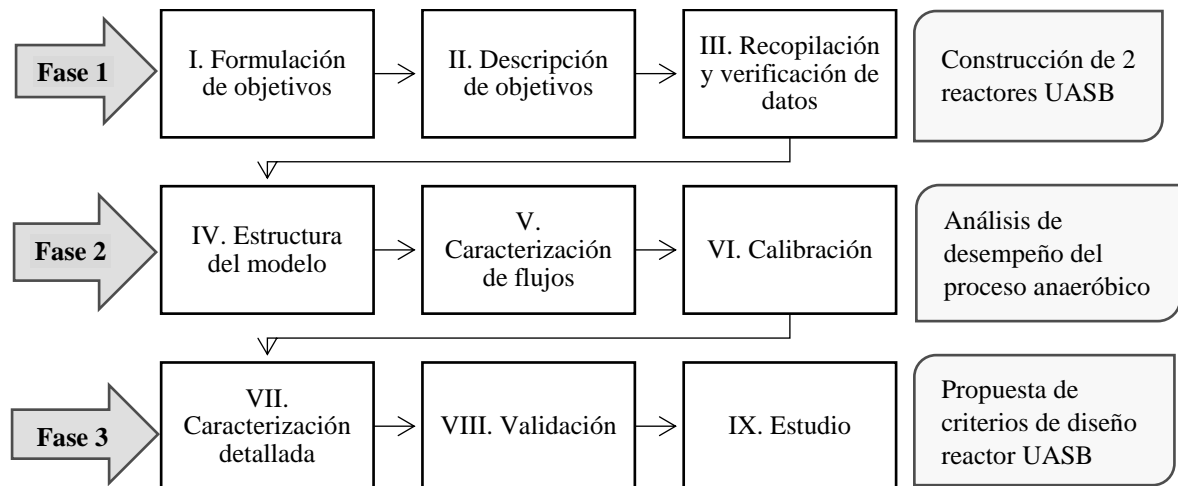


Figura 11. Estructura de metodología STOWA

Fuente: Hulsbeek et al. (2002)

El primer paso es la formulación de objetivos del estudio que conducen a una descripción del proceso o actividades para alcanzar dichos objetivos (paso 2). En el tercer paso, la recolección de datos sobre la composición y volumen de flujos, así como las características físicas. La verificación se realiza mediante el establecimiento del balance de masa. El paso de la estructura del modelo comprende elegir submodelos para establecer sistemas de carga, agitación y estabilización del proceso, entre otros. El quinto paso es la caracterización de flujos mediante la determinación de variables críticas influyentes en el modelo, así como la medición de parámetros del efluente y otros como flujos de recirculación (Seiffert, Köhler, Plattes, Henry y Schosseler, 2010).

El siguiente paso es la calibración del modelo. Por esto, el enfoque del protocolo STOWA recomienda una caracterización paso a paso y sugiere subconjuntos de parámetros del modelo (geometría del reactor y condiciones anaeróbicas favorables) que deberían concordar para alcanzar un buen ajuste a los datos medidos (paso 7). Antes de usar el modelo calibrado en un estudio, debe validarse con datos de una operación (paso 8 y 9), condición que es claramente diferente de la utilizada en calibración (*op. cit.*)

3.2.1 Fase 1: Construcción de dos reactores UASB con distintas dimensiones

La construcción de los dos modelos de reactores UASB se realizó a escala laboratorio, tomando en cuenta los principios de funcionamiento del reactor seleccionado. Para ello, se escogió la forma del reactor y se ensayó en dos modelos con igual diámetro y diferente altura, para elegir el mejor criterio de reactor en función de la relación L/D.

3.2.1.1 Diseño y construcción de los reactores

Para el diseño y construcción de los reactores UASB se tuvieron en cuenta varios factores y recomendaciones, tanto de la literatura como de expertos que han demostrado un amplio conocimiento y experiencia en esta área. Para el diseño de los reactores U. A. S. B. piloto se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

Características de diseño de los reactores anaeróbicos UASB

- Los reactores anaeróbicos (R1 y R2) se construyeron en material acrílico transparente de 4 mm de espesor y 10 cm de diámetro, la configuración es cilíndrica, con una altura de 60 cm (R1) y 108 cm (R2), que permitirá realizar la comparación del desempeño con relación al parámetro D/L (diámetro y altura).
- Para su ensamblaje se empleó una tapa de tol fijada a presión en la parte superior y otra en la inferior del reactor, adheridas con rodajas cada una, en donde se insertó sujetadores de alambre para mayor estabilidad. Los reactores se colocaron en forma vertical, fijados a una base metálica cada uno y situados sobre el piso.
- La forma del reactor es cilíndrica en virtud de las ventajas hidrodinámicas como, por ejemplo, la menor posibilidad de formación de zonas muertas, además del tamaño, volumen y carga que se propuso manejar. El diseño permite que la materia orgánica ingresada cumpla su reacción anaeróbica en el tiempo establecido. El

conducto de salida de biogás se ubica en la parte superior y las tuberías de carga y descarga en la parte inferior (Figura 12).

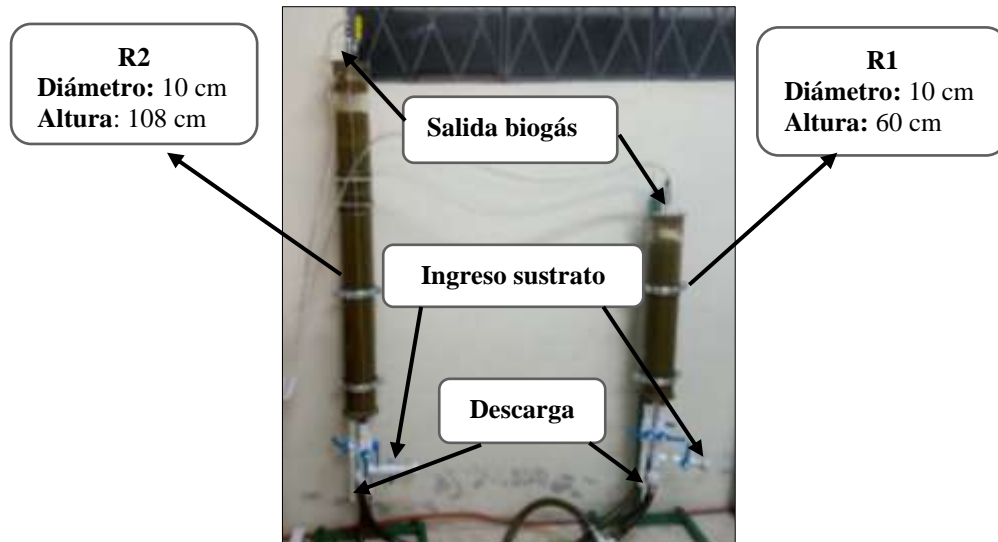


Figura 12. Configuración geométrica de reactores UASB

Sustrato de operación

La materia orgánica empleada en los reactores se obtuvo de la Granja Experimental “La Pradera”, se tomaron muestras homogéneas de estiércol vacuno que se almacenaron dentro de un refrigerador en canecas industriales plásticas de 5 galones, a una temperatura de 4 °C (Figura 13). La cantidad de estiércol fue de 145 g con 500 mL de agua de acequia, proveniente de lugares aledaños para cada reactor. Para acelerar el proceso, la primera carga de los reactores se tomó de un reactor anaeróbico tipo pistón para tratamiento de estiércol vacuno en operación.



Figura 13. Sustrato de experimentación

Homogenización del sustrato

Rodríguez (2020) y Nieto (2020) señalan necesario realizar una agitación manual a fin de obtener una correcta homogenización de la mezcla o contenido de un biorreactor para el proceso biológico, por la presencia de sólidos gruesos o partículas de gran tamaño, que pueden taponar y ocasionar un mal funcionamiento en los equipos. Por ello, se empleó una bomba manual de diafragma con capacidad de 6,5 galones por minutos a 60 bombeos por minuto (Figura 14).

La bomba manual de diafragma utilizada permitió mezclar el sustrato de operación del reactor, ingresar el nuevo sustrato de carga y recircular dicho sustrato con el de operación del reactor tal como lo señala FAO (2019). Para efectos del ensayo, se realizó bombeos diarios por un tiempo de 10 min a cada reactor, equivalente a 230 bombeos (23 bombeos por minuto). Cada 48 horas se realizó los bombeos señalados antes y después del proceso de entrada del sustrato, obteniéndose el doble de tiempo y bombeos (20 min = 460 bombeos) para lograr una correcta homogeneización del contenido de los reactores.



Figura 14. Bomba manual de diafragma para homogenizar sustrato

Características de operación

La operación de los reactores se llevó a cabo en un lugar cerrado no expuesto a la luz, para asegurar condiciones anaeróbicas más favorables. La temperatura promedio de la habitación fue de 23,6 °C y humedad relativa de 54%. La carga y

descarga del sustrato de R1 y R2 se efectuó cada 48 horas, aplicando el proceso de bombeo mencionado (Figura 15). La salida del sustrato en R1 y R2 se realizó mediante el tubo de descarga respectivamente, hasta extraer un volumen de 500 mL en cada reactor. Se obtuvieron muestras de descarga de R1, R2 y sustrato de ingreso de los reactores, para el análisis de variables críticas del proceso anaeróbico.

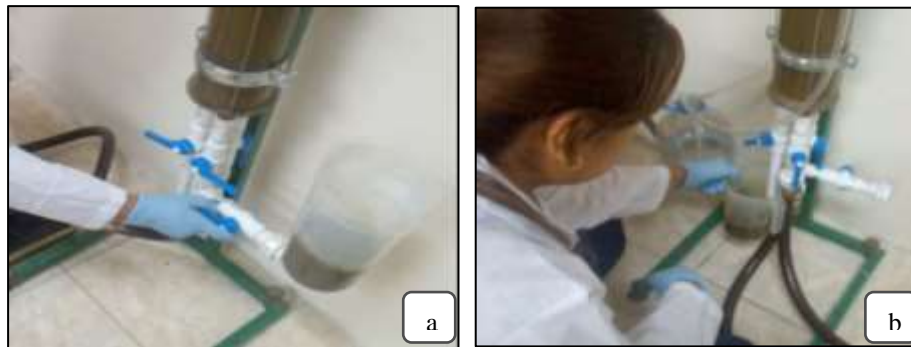


Figura 15. Características de operación: a) Carga del sustrato, y b) Descarga

Para el ingreso de materia orgánica se empleó un volumen de 500 mL de agua más 145 g de estiércol para cada reactor. Este sustrato fue sometido a calor en una cocina hasta elevar su temperatura a 20 °C, para acelerar el proceso anaeróbico (Nuntón, 2019). Luego se procedió a cernir el sustrato en un colador de orificio de 3 mm, para desechar las partículas de materia superiores a 3 mm y asegurar un adecuado funcionamiento de los reactores (Quinchía et al., 2019). Seguidamente se bombeó para ingresar el sustrato, tomando en cuenta la correcta posición de las llaves de las tuberías (FAO, 2019) (Figura 16).



Figura 16. Ingreso de materia orgánica: a) Sustrato calentado, b) Sustrato cernido, c) Residuo sustrato cernido, d) Ingreso de sustrato al reactor UASB

3.2.2 Fase 2: Análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor

En esta fase se analizan las variables importantes de desempeño para el proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor en los 30 días de operación, en relación con la producción de biogás. Se consideró el pH y temperatura del sustrato, la producción diaria (24 horas) y en 48 horas. Adicionalmente se registró la temperatura y humedad relativa del lugar al inicio y final del ensayo.

3.2.2.1 Medición variables críticas del proceso anaeróbico

Las variables críticas para el proceso anaeróbico que se consideraron fueron el pH y temperatura del sustrato de ingreso y salida de los reactores R1 y R2 (Figura 17). Estos datos se registraron cada 48 horas, tiempo en el que se realizaba la carga y descarga de los reactores. Se tomó las muestras en frascos plásticos diferentes y se realizó la correspondiente medición con el Multiparámetro CONSORT 562 cada 48 horas de los sustratos de salida e ingreso de los reactores. Para la medición de la temperatura ambiente y humedad se empleó un Termohigrómetro. Estos datos se registraron a diario, antes y después de la operación. El análisis estadístico de los datos fue procesado mediante graficas.

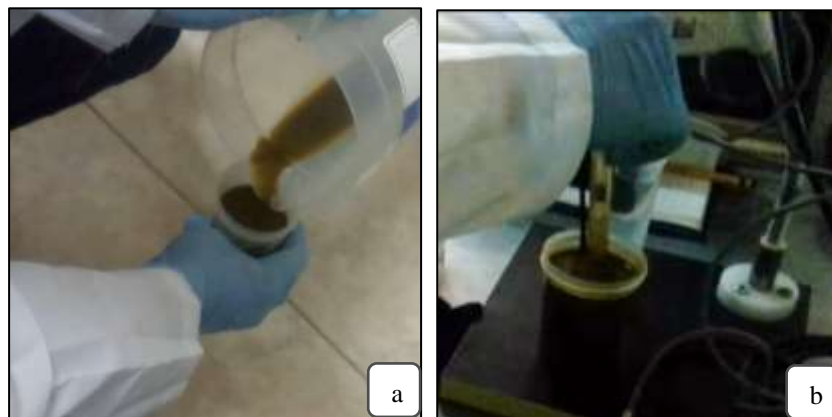


Figura 17. Mediciones variables críticas: a) Toma de muestras, b) Medición pH y temperatura

3.2.2.2 Producción de biogás

Para medir la producción de biogás se aplicó el Principio de Pascal (Cotos, 2019), controlando el volumen por desplazamiento de fluidos (Nuntón, 2019; Martínez et al., 2016). Se empleó dos botellas plásticas resistentes de 2 litros, a las cuales se llenó de agua completamente a presión y se las introdujo en un recipiente plástico con agua, luego se retiró la tapa de las botellas y se ingresó las mangueras de 3/8" transparentes de salida de biogás de R1 y R2 dentro de cada botella respectivamente.

En el tiempo de experimentación se observó que la presión ejercida por el biogás generaba un desplazamiento del agua en las botellas, bajando el nivel, lo que indicaba que el espacio desplazado equivalía al volumen de biogás generado. Cabe mencionar que, previamente a la medición, se graduaron las botellas cada 250 mL utilizando una probeta de laboratorio graduada, en la que se colocó 250 mL de agua y se vertió el contenido dentro de la botella para registrar la medida hasta llenar la botella. Los registros se los tomó diariamente en los dos reactores, aunque para efectos de tratamiento de datos se empleó los registrados cada 48 horas (Figura 18).

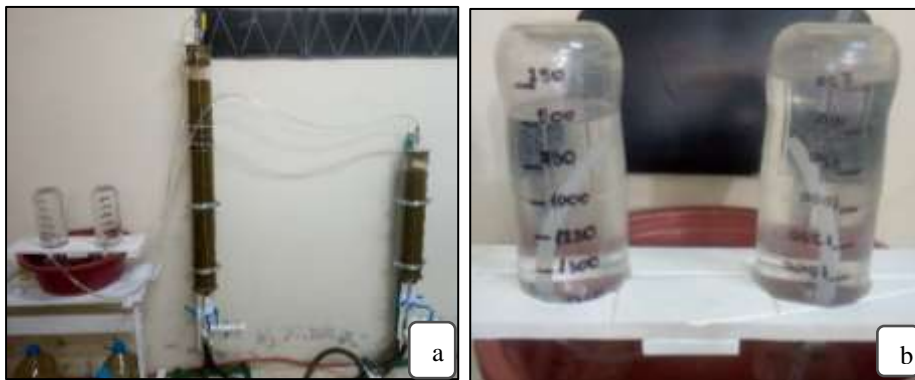


Figura 18. Medición de biogás por desplazamiento de fluidos

Los datos obtenidos fueron analizados en el software R-3.6.2 y Matlab R2018b para obtener el valor medio y la media. La función para los valores de producción se realizó mediante un suavizado exponencial por el método de Kernel gaussiano, que

se integró para hallar el valor medio. Se realizó una prueba T-test a los datos de producción histórica diaria en los dos modelos de reactor.

3.2.3 Fase 3: Propuesta de criterios de diseño del reactor UASB para aprovechamiento energético

Luego del análisis de resultados de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB), se procedió en función de los parámetros de control y producción de biogás, proponer el diseño geométrico óptimo en función de la relación diámetro-altura (L/D) del reactor que presente las condiciones anaeróbicas más favorables, para usarse en pequeñas unidades agroproductivas con fines energéticos en la provincia de Imbabura.

Estas propuestas de criterios de diseño del reactor UASB se presentan en 3 secciones, la primera sobre características de diseño, la segunda acerca de las características de operación y la tercera sobre el desempeño anaeróbico óptimo. Las características de diseño responden a la forma, relación diámetro: altura y altura del sustrato recomendada.

Las características de operación se plantean con relación al sustrato de operación (materia orgánica, relación estiércol: agua y frecuencia de carga), homogenización de la mezcla (sistema de agitación, frecuencia, tiempo y total de bombeo) y cuantificación del biogás (método y frecuencia de medición). Finalmente, las características de desempeño del proceso anaeróbico se asumen en función de las condiciones más favorables de las variables críticas del proceso: pH, temperatura y producción de biogás.

3.3 Materiales y equipos

Para la realización del trabajo de investigación se utilizó los siguientes materiales y equipos (Tabla 1).

Tabla 1. Materiales y equipos

Materiales y equipos	
Tipo	Descripción
Material experimental	<ul style="list-style-type: none">– Reactores UASB– Sustrato de estudio (estiércol vacuno)– Tubo de acrílico 4 pulgadas x 1.80 m
Equipos	<ul style="list-style-type: none">– Balanza electrónica capacidad 5 kg x 1gr– Cámara fotográfica– Termohigrómetro– Multiparámetro CONSORT 562– Refrigerador– Cocina

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados y discusión obtenidos durante el tiempo de ejecución del estudio investigativo, con base en cada uno de los objetivos específicos propuestos.

4.1 Construcción de dos reactores UASB con distintas dimensiones

Para la construcción de los reactores UASB se escogió un diseño de columna cilíndrica y un separador gas-líquido-sólido por la alta eficiencia, sencillez, requerimiento de espacio pequeño, bajo consumo de energía y baja producción de lodos (Chong, Sen, Kayaalp y Ang, 2012). Los resultados se presentan en función de las características de diseño de los reactores anaeróbicos UASB y las características de operación.

4.1.1 Características de diseño

En este apartado se muestran los resultados de la comparación del desempeño con relación al parámetro L/D (longitud y diámetro). En la Tabla 2 se presentan los resultados de las características geométricas de los dos reactores UASB.

Tabla 2. Características geométricas de reactores UASB

Datos	R1	R2	
Diámetro (cm)	10	10	
Altura (cm)	60	108	
Altura sustrato (cm)	51	75	
Relación L/D	5,1	7,5	
Volumen reactor (cm^3)	$V = \pi r^2 h$	4712	8482
Volumen reactor (L)	5	8	

Como se observa la relación longitud – diámetro (L/D) para R1: 5,1 y para R2: 7,5. Al respecto, Martí (2019) establece que un reactor se considera de forma tubular si su relación L/D está entre 5 y 10 y la relación óptima entre la longitud y el diámetro para un reactor será de 7,5. Por lo tanto, el reactor 2 presenta la configuración geométrica óptima para su desempeño. Esto significa que a mayor longitud mayor producción de biogás, como se observa en la Figura 19.

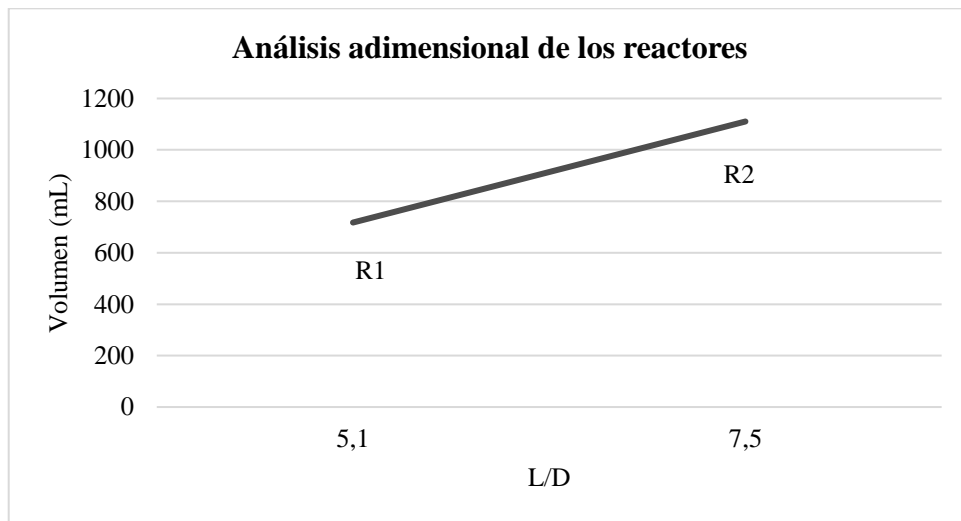


Figura 19. Análisis adimensional de los reactores UASB

4.1.2 Características de operación

Los resultados se presentan en función de las condiciones experimentales para cada uno de los reactores: sustrato de operación, sistema de agitación para homogenización del sustrato y método de cuantificación de biogás.

Sustrato de operación

En el presente estudio se escogió el estiércol de vaca por ser el más equilibrado, abundante y requerir menor cantidad de agua para la mezcla para producción de biogás en pequeñas unidades agroproductivas (Castells, Flotats y Campos, 2012; Martí, 2019). Cabe señalar que el Atlas Bioenergético de Ecuador (MEER, 2014)

lo considera como uno de los residuos pecuarios de mayor densidad de Imbabura. La Tabla 3 muestra los resultados en torno al sustrato de operación.

Tabla 3. Características del sustrato de operación

Datos	R1	R2
Altura sustrato (cm)	51	75
Volumen sustrato (cm^3) $V = \pi r^2 h$	4005,5	5890,5
Volumen sustrato (L)	4	6
Relación estiércol: agua	1:3	1:3
Volumen de carga (mL)	500	500
Volumen de descarga (mL)	500	500
Frecuencia de carga y descarga (h)	48	48
Peso de materia orgánica/carga (g)	200	200
Peso de materia orgánica colada/carga (g)	55	55
Peso de materia orgánica total /carga (g)	145	145
Densidad sustrato/descarga (kg/m^3)	1001	1000
Presión hidrostática (Pa) $P_H = \rho gh$	500181	735239

Los resultados sobre la relación estiércol: agua 1:3 se tomó con base en lo descrito por Martínez et al. (2016) y Martí (2019). De acuerdo con la frecuencia de carga y volumen de carga y descarga se considera un reactor semicontinuo (FAO, 2011)

Sistema de agitación y homogenización del sustrato

El sistema de agitación empleado para la homogenización del sustrato fue de recirculación del contenido descrito por Solera del Río (2014), mediante una bomba manual de diafragma. La Tabla 4 muestra las características de homogenización en los dos reactores.

Tabla 4. Características del sistema de homogenización del sustrato

Datos	R1	R2
Frecuencia de bombeo (horas)	24	24
Número de bombeos por min	23	23
Total, bombeo en 10 min (24 horas)	230	230
Tiempo de bombeo en día de carga (min)	20	20
Total, bombeo en 20 min (48 horas)	460	460

Los resultados de la homogenización con relación a la configuración geométrica del reactor y óptimo proceso anaeróbico muestran que existe un mejor mezclado del sustrato fresco, maximización del volumen efectivo del reactor (Nuntón, 2019), homogenización de temperatura y concentración de la mezcla (Quinchía et al., 2019), eliminación del biogás de la mezcla y prevención de estratificación de sólidos en la parte superior del reactor en R2 comparado con R1. Sin embargo, R1 presenta mayor homogenización de la mezcla que R2 sin requerir cernir la materia orgánica.

Método de cuantificación de biogás

Los resultados de los registros históricos de biogás muestran la efectividad del método de desplazamiento de fluidos para la cuantificación del gas en los reactores, tal como lo describe Martínez et al. (2016) y Nuntón (2019). La Tabla 5 muestra las características de la cuantificación de biogás en los reactores.

Tabla 5. Características cuantificación de biogás

Datos	R1	R2
Método	Desplazamiento de fluidos	
Tiempo (días)	30	30
Frecuencia (horas)	24	24
Número de datos (intervalo 48 horas)	15	15

La mayor producción de biogás con referencia al método de cuantificación es la registrada para R2 en comparación con R1 tanto en 24 como en 48 horas. FAO (2019) destaca la medición de producción de biogás como parte de los controles básicos que permiten dar seguimiento y entender cómo funciona el sistema y la eficiencia que tiene.

4.2 Análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor

Los resultados del análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los modelos del reactor R1 y R2 se muestran en función de las variables críticas de desempeño del reactor (pH y temperatura) y producción de biogás, con base en los registros históricos.

Temperatura histórica del sustrato

Con referencia a los registros históricos de temperatura de los sustratos de operación en los reactores, la variable temperatura presenta un comportamiento similar en el tiempo para el reactor 1 y 2, a diferencia del sustrato de entrada, que sufre un incremento de temperatura, previo a someterse al proceso anaeróbico. La experimentación estuvo en un lugar cerrado con una media de temperatura de 23,6 °C (superior a temperatura ambiente local) y humedad relativa de 54 % (inferior a humedad relativa local), que permitió mayor estabilidad de dicho parámetro. En la Figura 20 se presenta la variación de temperatura en el tiempo de experimentación para los sustratos de salida (R1 y R2) y de entrada (carga).

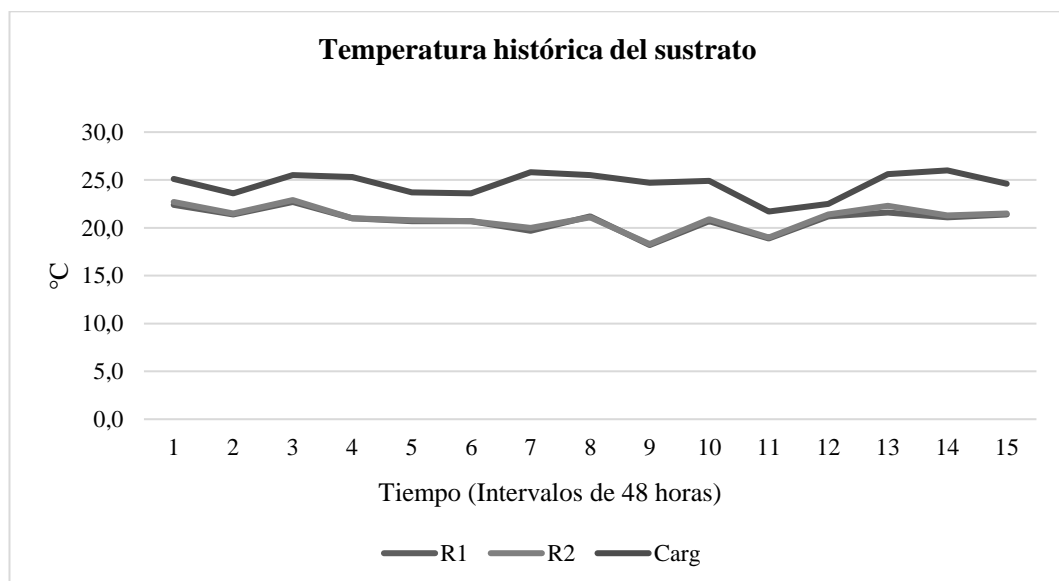


Figura 20. Temperatura histórica del sustrato en reactores UASB

La media de temperaturas registrada para R1 es de 20,9 °C y para R2 es de 21,0 °C (Tabla 6), obteniéndose un proceso más estable en el segundo reactor con referencia al aprovechamiento energético, operando en rango de temperatura mesofílico. FAO (2011), Martínez et al. (2016), Criollo et al. (2014) y Nuntón (2019) señalan que el rango de temperatura para favorecer el proceso de digestión anaeróbica es el mesofílico (> 20°C). Quinchía et al. (2019) sostiene que las bacterias metanogénicas digieren la materia orgánica más eficientemente en este rango y un adecuado sistema de agitación o mezclado contribuye a homogenizar la temperatura. Las condiciones más favorables del proceso anaeróbico se dan en reactores térmicamente aislados para evitar cambios bruscos de temperatura (FAO, 2011), por ello el lugar de operación de los reactores se llevó a cabo en un espacio cerrado.

Tabla 6. Medición histórica de temperatura

Día	Reactor 1 (°C)	Reactor 2 (°C)
1	22,4	22,7
2	21,4	21,5
3	22,7	22,9
4	21,0	21,0
5	20,7	20,8
6	20,7	20,7
7	19,7	20,0
8	21,2	21,1
9	18,2	18,3
10	20,7	20,9
11	18,9	19,0
12	21,2	21,4
13	21,6	22,3
14	21,1	21,3
15	21,4	21,5
Media	20,9	21,0

pH histórico del sustrato

Con referencia a los registros históricos de pH de los sustratos de operación en los reactores, se observa que la variable pH al igual que la temperatura presentan un

comportamiento similar en el tiempo para el reactor 1 y 2, a diferencia del sustrato de entrada, no sometido al proceso anaeróbico. En la Figura 22 se presenta la variación del pH en el tiempo de experimentación para los sustratos de salida (R1 y R2) y de salida (carga).

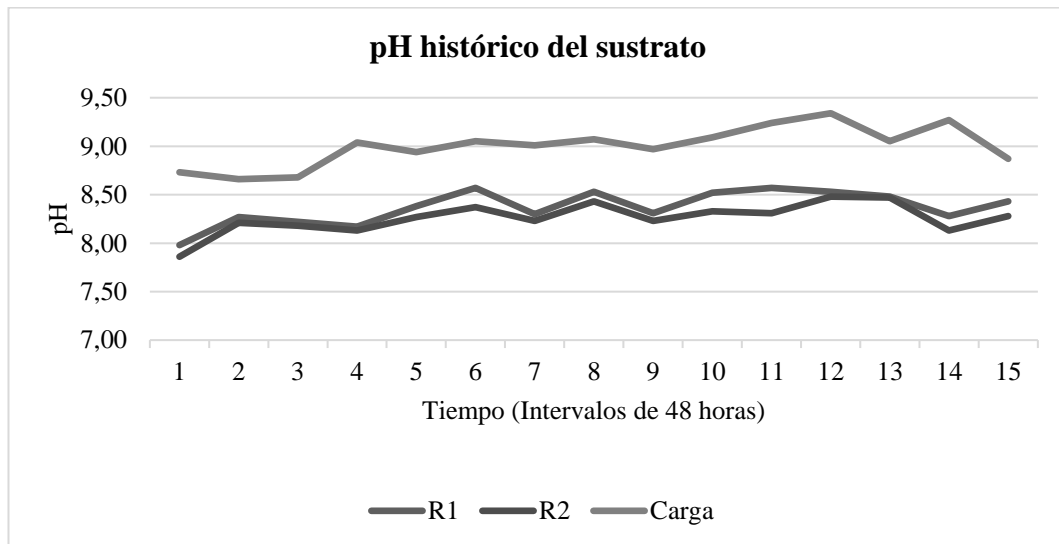


Figura 21. pH histórico del sustrato en reactores UASB

La media de pH registrada para R1 es de 8,37 y para R2 es de 8,26 (Tabla 7), obteniéndose un proceso más estable en el segundo reactor con relación al aprovechamiento energético. Con referencia a las medias de pH de R1 y R2, se observa que R2 tiene una media más cercana al rango óptimo de trabajo de las bacterias metanogénicas indicado por FAO (2011) y Martí (2019) de 7,8 a 8,2. Bedoya y Chaparro (2016) afirman que la mayor producción de biogás en el reactor en operación, se produjo a pH mayores a 7. Nuntón (2019) señala que valores inferiores inhiben la acción de las bacterias y con ella la producción de biogás. Criollo et al. (2014) señala que el sistema de homogenización permite mantener el pH en un rango estable.

Tabla 7. Medición histórica de pH

Día	Reactor 1	Reactor 2
1	7,98	7,86
2	8,27	8,21
3	8,22	8,18
4	8,17	8,13
5	8,38	8,27
6	8,57	8,37
7	8,30	8,23
8	8,53	8,43
9	8,31	8,23
10	8,52	8,33
11	8,57	8,31
12	8,53	8,48
13	8,48	8,47
14	8,28	8,13
15	8,43	8,28
Media	8,37	8,26

Producción de biogás histórica

La Figura 23 muestra la producción de biogás de los reactores R1 y R2 en el tiempo de experimentación. Los datos se registraron diariamente, no obstante, por efectos de toma de datos de variables críticas se presentan los registrados cada 48 horas. Se observa una mayor producción de biogás de R2 vs R1, en donde, se registró también un pH y temperatura estable.

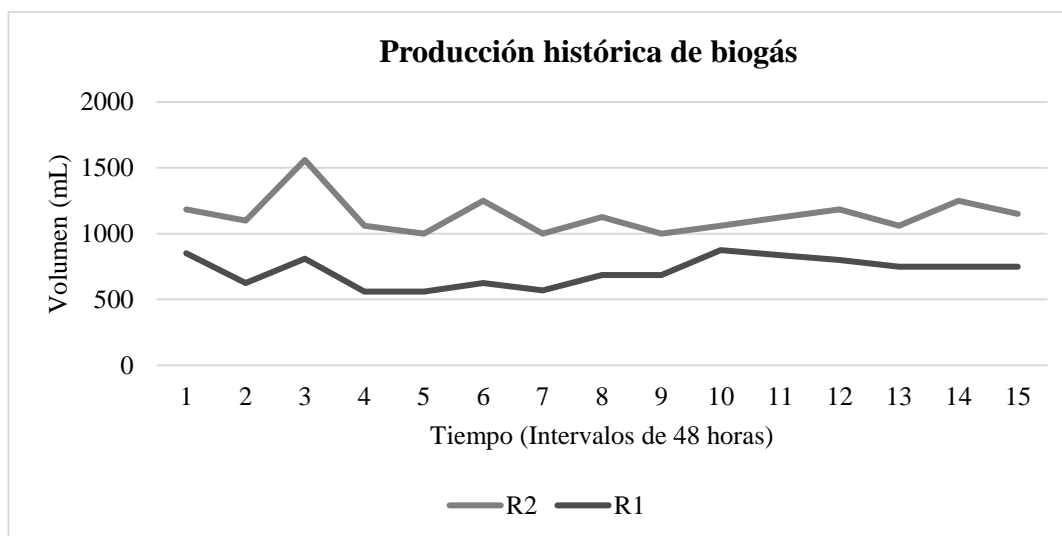


Figura 22. Producción histórica biogás R1 y R2

La producción de biogás total en los 30 días de experimentación para los reactores R1 y R2 fue de 11 L y 17 L respectivamente. La media de producción para R1 es de 716 mL, mientras que para R2 de 1141 mL. El valor medio para R1 es de 695 mL y para R2 es de 1030 mL (Tabla 8). Se observa que tanto la media y valor medio más altos corresponden a R2. Estos datos se corresponden con los obtenidos para las variables críticas (pH y temperatura) para el mismo reactor. Quinchía et al. (2019) afirma que la variación de la temperatura afecta significativamente la digestión anaerobia y la cantidad de biogás producido. Bedoya y Chaparro (2016) manifiestan que la mayor producción de biogás está influenciada por el pH. En este sentido, la mayor temperatura y el pH óptimo de operación de las bacterias metanogénicas favorecieron la mayor producción de biogás en el reactor dos.

Tabla 8. Medición histórica de biogás

Día	Reactor 1 (mL)	Reactor 2 (mL)
1	850	1185
2	625	1100
3	810	1560
4	560	1060
5	560	1000
6	625	1250
7	570	1000
8	685	1125
9	685	1000

Día	Reactor 1 (mL)	Reactor 2 (mL)
10	875	1060
11	838	1123
12	800	1185
13	750	1060
14	750	1250
15	750	1150
Total	10733	17108
Media	716	1141
Valor medio	695	1030

Análisis estadístico

Se realizó un tratamiento de datos en el software R para verificar si existen observaciones atípicas, por lo que, mediante la distribución normal se estableció un puntaje de corte z-score que abarque el 99,7% de los cuantiles. De esta manera se encontró que no existen observaciones atípicas, por lo que, los 60 datos fueron empleados para la prueba T.

Para verificar los supuestos que requiere la prueba T se ejecutaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para las muestras simultáneamente. En los resultados de la prueba de Shapiro ejecutada se obtuvo un $P < 0,05$, por lo que se acepta el supuesto de normalidad. Así mismo, se verificaron y aceptaron los supuestos de linealidad, normalidad, homogeneidad y homocedasticidad. Se procedió a realizar la prueba T para las muestras de producción de biogás de los dos reactores, cuyos resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados T-test

	Reactor 1	Reactor 2
Media (mL)	716	1141
T-test	P = 1,648 x 10e-6 ***	

Se interpreta que existe una diferencia significativa ($P < 0,05$) en la producción de biogás entre los dos reactores, siendo el reactor 2 el que da mejores resultados de producción de biogás con base en su media.

4.3 Propuesta de criterios de diseño del reactor UASB para aprovechamiento energético

Luego del análisis de resultados de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor (R1 y R2), con referencia a los parámetros de control y producción de biogás, se propone el diseño geométrico óptimo del reactor dos (R2) en función de la relación diámetro-altura (L/D: 7,5) para usarse en pequeñas unidades agro productivas con fines energéticos en la provincia de Imbabura. Los resultados se presentan en tres secciones, la primera sobre características de diseño, la segunda acerca de las características de operación y la tercera sobre el desempeño anaeróbico óptimo.

4.3.1 Características de diseño

Se propone los criterios de diseño en función de las características geométricas del reactor UASB más eficiente (R2), considerando la forma, la relación diámetro: altura y la altura del sustrato recomendada (Tabla 10).

Tabla 10. Propuestas de criterio: características geométricas

Características geométricas	Criterio propuesto
Forma	Cilíndrica
Relación L/D	7,5
Altura sustrato	70 – 80% de altura total

La geometría cilíndrica del reactor UASB se propone en virtud de las ventajas hidrodinámicas como la menor posibilidad de formación de zonas muertas (Caicedo, 2006), mayor hermeticidad (FAO, 2011) y obtener mediciones de variables, productos y subproductos del proceso de biodigestión con mayor facilidad (Lanza, 2016; Sánchez, 2019). La relación óptima entre la longitud y el diámetro para un reactor cilíndrico será de 7,5 y la altura del sustrato en un rango de 70 a 80% de la altura total, dado que el volumen del biodigestor a más de la parte

que ocupa la fase líquida debe considerar la parte que ocupa la fase gaseosa para su óptima operación (Martí, 2019).

4.3.2 Características de operación

Se propone los criterios de diseño en función de las características de operación de R2 con relación al sustrato de operación, homogenización de la mezcla y cuantificación del biogás (Tabla 11).

Tabla 11. Propuestas de criterio: características de operación

Características	Criterio propuesto
Sustrato de operación	
Materia orgánica	Estiércol vacuno
Relación estiércol: agua	1:3
Frecuencia de carga (h)	48 a 72
Homogenización de mezcla	
Sistema de agitación	Recirculación del contenido
Frecuencia de bombeo (h)	24
Tiempo de bombeo (min)	10
Total, de bombeos en 10 min	230
Cuantificación de biogás	
Método	Desplazamiento de fluidos
Frecuencia de medición (h)	24

Con base en los resultados de desempeño anaeróbico en los modelos de reactor, se propone emplear el estiércol de vaca para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agroproductivas en Imbabura por ser más equilibrado (Castells, Flotats y Campos, 2012) y ser un residuo pecuario de mayor densidad de Imbabura (MEER, 2014). Se recomienda la relación volumen estiércol: agua 1:3 (Martí, 2019), emplear el sistema de recirculación del contenido (Solera del Río, 2014) para la homogenización del sustrato (Nuntón, 2019; Quinchía et al., 2019). Agregar volúmenes de nuevas cargas y descargar la misma cantidad de efluente que se incorporó de forma regular (FAO, 2011) y cuantificar el biogás a diario con el método de desplazamiento de fluidos (Martínez et al., 2016; Nuntón, 2019).

4.3.3 Características de desempeño del proceso anaeróbico

Se propone los criterios de diseño en función de los resultados de desempeño del proceso anaeróbico en R2 que presentó las condiciones más favorables de las variables críticas del proceso pH, temperatura y producción de biogás (Tabla 12).

Tabla 12. Propuestas de criterio: desempeño del proceso anaeróbico

Características	Criterio propuesto
Rango de temperatura	Mesofílico (20°C a 40°C)
pH	7,8 a 8,2

Como se observa en la Tabla 14, una de las propuestas de criterios de desempeño que presenta condiciones anaeróbicas más favorables es mantener estable el rango de temperatura mesofílico (FAO, 2011; Martínez et al., 2016; Criollo et al., 2014 y Nuntón, 2019) y un rango equilibrado de pH de 7,8 a 8,2 (FAO, 2011; Pérez, 2018; Martí, 2019). Así mismo, evitar cambios bruscos de temperatura en el lugar de operación (FAO, 2011). Estas condiciones afectan significativamente la producción de biogás según los resultados de las variables descritas para R2.

En síntesis, de acuerdo con los resultados globales de la investigación y en función de los objetivos del estudio, con referencia a la construcción de los dos modelos de reactores UASB con distintas dimensiones, R2 presenta la relación D/L óptimo en función de las condiciones anaeróbicas favorables, resultados que concuerdan con Castells, Flotats y Campos, 2012; Martínez et al., 2016; Nuntón, 2019; Martí, 2019 y Quinchía et al., 2019.

Con referencia al análisis de desempeño del proceso anaeróbico en los dos modelos de reactor, R2 presenta mayor estabilidad en los rangos de las variables del proceso, se obtuvieron resultados semejantes en los estudios de Criollo et al. (2014), Bedoya y Chaparro (2016) y Pérez et al. (2018). Finalmente, los resultados de las propuestas de criterios de diseño del reactor UASB para aprovechamiento energético coinciden con los obtenidos por Solera del Río (2014), Lanza (2016) y Sánchez (2019).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En la construcción de los dos modelos de reactores UASB, se obtuvo la mejor configuración geométrica cilíndrica para R2 con una relación diámetro-altura L/D:7,5 y altura del sustrato del 70% de la altura total, que facilitó la homogenización de mezcla, estabilización de las variables críticas y mayor producción de biogás.
- El material de vidrio acrílico transparente permitió mayor hermeticidad, visualizar el comportamiento del proceso anaeróbico y obtener mediciones de variables con mayor facilidad.
- El análisis de desempeño muestra condiciones anaeróbicas favorables en R2 que presentó pH (8,2) y temperatura equilibrado (21°C). Estas variables afectaron significativamente la producción de biogás. El T-test presentó diferencia significativa ($P < 0,05$) en la producción de biogás entre los dos reactores, siendo el reactor 2 el que da mejores resultados de producción de biogás con base en su media.
- La propuesta de criterios de diseño de los reactores UASB considera tres aspectos de R2: características de diseño (forma, relación L/D y altura del sustrato), características de operación (sustrato de operación, homogenización de la mezcla y cuantificación de biogás) y el desempeño anaeróbico del reactor (pH y temperatura).
- El sustrato de operación fue estiércol vacuno con una relación 1:3, frecuencia de carga (semicontinuo) cada 48 horas, sistema de agitación mediante recirculación

del contenido y de cuantificación de biogás por el método de desplazamiento de fluidos.

- El análisis del reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB) es importante para definir la óptima configuración geométrica (relación diámetro-altura) en función del mejor desempeño anaeróbico para aprovechamiento energético en pequeñas unidades agro productivas en Imbabura.

5.2 Recomendaciones

- Efectuar estudios de rendimiento del proceso anaeróbico en reactores de flujo ascendente de forma cilíndrica con la relación D/L mayor a 7, con otros tipos de sustratos abundantes en la zona y analizar el comportamiento de variables críticas en relación con el desempeño del proceso anaeróbico y producción de biogás obtenidos. Experimentar con otro sistema de recirculación (bomba) o implementar sistemas de agitación mecánica (turbina o agitadores), así como sistemas automatizados para el control de variables.
- Fomentar la investigación en temas de aprovechamiento bioenergético a partir de residuos agropecuarios de la zona. Replicar nuevos estudios en diferentes condiciones locales, analizando el comportamiento de las variables involucradas en el proceso anaeróbico y producción de biogás, susceptibles a variar en relación con la temperatura.
- Difundir la tecnología de reactores de flujo ascendente, como una propuesta alternativa y ambientalmente amigable en pequeñas unidades agroproductivas para la provincia, con fines energéticos. Proponer criterios de diseño de otros reactores que puedan implementarse en pequeñas fincas, para aprovechamiento de los residuos generados y producción de energía limpia.

REFERENCIAS

- Allende, G. y Mendoza, A. (2019). *Proyecto de un diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Lambayeque con el uso de un reactor UASB*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú.
- Aranda, C. (2019). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un sistema Down-flow Hanging Sponge (DHS) utilizando esponjas cilíndricas colgantes de poliuretano*. (tesis de pregrado). Universidad Peruana Unión, Lima, Perú.
- Bedoya, E. y Chaparro, E. (2016). Uso del estiércol de animales para la producción de biogás en Moquegua. *Revista ciencia y tecnología para el desarrollo-UJCM*, 2(4), 39-44. Recuperado de: <https://bit.ly/2Urb0ZD>
- Bermúdez, T. y Rozo, A. (2018). *Alternativas de tratamiento para aguas residuales en la planta de beneficio animal caso estudio: Cáqueza Cundinamarca*. (tesis de pregrado), Bogotá, Colombia.
- Borja, J. (2015). *Diseño e implantación de un reactor anaeróbico UASB en la industria de los lácteos para su uso como fuente de energía en cogeneración* (Tesis de pregrado). Universidad Pontificia Comillas, Madrid-España.
- Caicedo, F. (2006). *Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados*. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales-Colombia
- Cajamarca, D, Paredes, M, Guananga, M. y Guevara, L. (2018). *Sostenibilidad económica de un compost elaborado a partir de los residuos de la agroindustria cañera ecuatoriana*. Recuperado de: <https://bit.ly/2wuqoMU>
- Campos, R. y Parra, R. (2014). Evaluación del comportamiento de un reactor UASB con diferentes cargas orgánicas provenientes de lactosuero. *Producción+ Limpia*, 9(1), 23-30. Recuperado de: <https://bit.ly/2Vhv5lm>
- Castells, X., Flotats, X. y Campos, E. (2012). Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos. *Ediciones Díaz de Santos*.

- Castillo, D. y Tito, C. (2011). Obtención de Biogás a Partir de Excremento de Cuy en Condiciones Ambientales en Tacna Perú. *Revista Ciencia y Desarrollo*, (13), 84-91. Recuperado de: <https://bit.ly/3e0XbKp>
- Chiva, S., Berlanga, J., Martínez, R. y Climent, J. (2018). *Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia*. Recuperado de: <https://bit.ly/2KcTkfd>
- Chong, S., Sen, T., Kayaalp, A. y Ang, H. (2012). Mejoras en el rendimiento de los reactores de manta de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) para el tratamiento de lodos domésticos, una revisión de última generación. *Water research*, 46(11), 3434-3470.
- CONELEC. (2013). *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022*. Recuperado de <https://bit.ly/39NQGqY>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Registro Oficial No. 449, 20 de octubre 2008*. Ecuador.
- Cotos, R. (2019). *Mecánica de fluidos*. Recuperado de: <https://bit.ly/2RjFZ96>
- Criollo, B., Alvarado, J. y Numpaqué, H. (2014). Control PID de temperatura y dosificación de pH para la producción de gas metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA)*, 2(24), 134-141. Recuperado de: <https://bit.ly/2J5nbpt>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). (2011). *Manual de biogás*. Recuperado de: <https://bit.ly/39P0i4B>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). (2018). *Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM)*. Recuperado de: <http://www.fao.org/gleam/results/es/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Recuperado de: <https://bit.ly/2xR7X56>
- Flores, E. y Vidal, P. (2019). *Evaluación de la planta de tratamiento de agua residual de Bosques de Santa Ana conformada por un reactor anaerobio de flujo ascendente de manto de lodos (UASB) con postratamiento de lodos activados* (tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

- Hernández, F. (2015). *Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial*. Recuperado de: <https://bit.ly/2yNQGdC>
- Hulsbeek, J., Kruit, J., Roeleveld, P. y Van Loosdrecht, M. (2002). Un protocolo práctico para el modelado dinámico de sistemas de lodos activados. *Water Sci. Technol.* 45 (6), 127–136.
- IEA (Agencia Internacional de Energía). (2018). *La bioenergía moderna lidera el crecimiento de todas las energías renovables hasta 2023, según las últimas previsiones del mercado de la AIE*. Recuperado de: <https://www.iea.org/renewables2018/>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2016). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua*. Recuperado de: <https://bit.ly/2Vc6EpA>
- INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable). (2014). *Línea de investigación: Biomasa*. Recuperado de: <https://www.iner.gob.ec/biomasa/>
- INER (Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable). (2016). *Análisis de oportunidades de I+D+i en Eficiencia Energética y Energías Renovables en Ecuador*. Recuperado de: www.iner.gob.ec
- INHAMI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2015). *Boletín climatológico anual 2015*. Recuperado de: <https://bit.ly/3e6yOLq>
- IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovable). (2016). *Beneficios de las energías renovables*. Recuperado de: <https://bit.ly/2xdAfHb>
- IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovable). (2017). *Biogás para cocinar en el país*. Recuperado de: <https://bit.ly/39UIJBe>
- IRENA (Agencia Internacional de Energía Renovable). (2018). *Bioenergía*. Recuperado de: <https://www.irena.org/bioenergy>
- Lanza, V. (2016). Determinación del campo de velocidades en un reactor. *En XX Encuentro de Jóvenes Investigadores de la Universidad Nacional del Litoral*, Santa Fe, Argentina.
- Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica. (2015). *Registro Oficial Suplemento 418, 16 de enero 2015*. Ecuador

- López, E., Jiménez, J., Romero, O. y Dewulf, J. (2012). Aplicación de la tecnología de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos agroindustriales utilizando inóculo de estiércol porcino, en condiciones mesofílicas. *Tecnología Química*, 32(3), 274-281. Recuperado de: <https://bit.ly/2URt1Sf>
- Lorenzo, Y. y Obaya, M. (2005). La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. *Parte I. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XXXIX, (1), 35-48. Recuperado de: <https://bit.ly/2YwRaA2>
- Lozada, J. (2013). *Obtención de biogás en base a mezclas de gallinaza con residuos orgánicos de cerdo y cuy* (tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato. Recuperado de: <https://bit.ly/2XiznM4>
- Luna, E. (2015). *Respuestas de tres fungicidas en el control de la Roya (Puccinia hordei GH Otth y Puccinia Striiformis Westend.) en cebada (Hordeum vulgare) variedades malteras escalett y metcalfe en Chaltura-Imbabura* (tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
- Madueño, R. (2018). *Tratamiento de efluentes de un reactor UASB mediante una mezcla de amonio cuaternario y hierro* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- MAE (Ministerio de Ambiente del Ecuador). (2016). *Primer informe bienal de actualización del Ecuador*. Quito
- Mata, J., Dosta, J., Romero, M., Fonoll, X., Peces, M., y Astals, S. (2014). Una revisión crítica sobre los logros de codigestión anaeróbica entre 2010 y 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. Recuperado de: <https://bit.ly/3c1wpzB>
- Martí, J. (2019). *Biodigestores tubulares. Guía de diseño y manual de instalación*. Ecuador Redbiolac.
- Márquez, M. y Martínez, S. (2011). *Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB): Antología. Ciudad de México*. Centro Tecnológico Aragón. Recuperado de: <https://bit.ly/39xCLF1>
- Martínez, S., Numpaque, H. y Alvarado, J. (2016). Efecto de la Temperatura en la Producción de Biogás en un biorreactor tipo Bacht a través de la Descomposición Anaeróbica de Residuos Sólidos Orgánicos. *ENGI Revista*

- Electrónica de la Facultad de Ingeniería*, 3(1), 16-19. Recuperado de: <https://bit.ly/2vMCkt2>
- MEER (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable). (2014). *Atlas Bioenergético del Ecuador*. Recuperado de: <https://bit.ly/2RjJPIn>
- Moreno, J., Moral, R., García, J., Pascual, J. y Bernal, M. (2016). *De residuo a recurso: El camino de la sostenibilidad*. Recuperado de: <https://bit.ly/3c1wNy1>
- Muñoz, M., Sánchez, M., Vera, O. y Párraga, R. (2018). Buen vivir: Desde la propuesta indígena y ambiental. *Polo del Conocimiento*, 3(1 Esp), 399-416. Recuperado de: <https://bit.ly/2VfDDt0>
- Nieto, L. (2020). *Modelamiento y simulación de un Biorreactor de Membrana (MBR) para un agua residual a la salida de Trujillo* (tesis de maestría). Trujillo, Perú.
- Nuntón, S. (2019). *Influencia de la temperatura y pH en el rendimiento de obtención de biogás a partir de bagazo de caña y estiércol de equino mediante un digestor Batch*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional “Pedro Ruíz Gallo”, Lambayeque, Perú.
- ONU. (2015). *Agenda 2030: Objetivos de desarrollo Sostenible*. Ottawa: Autor.
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C. y Fernández, F. (2018). Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Scientia agropecuaria*, 9(3), 381-391. Recuperado de: <https://bit.ly/3e5YKGG>
- Paredes, D. (2018). *Sostenibilidad económica financiera de las estrategias para el manejo de residuos en sistemas de producción ganaderos en las provincias de Napo, Manabí e Imbabura*. (Tesis de posgrado). Universidad de las Fuerzas Armadas. Recuperado de: <https://bit.ly/2yLDaxB>
- Parra, D., Botero, M. y Botero, J. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 149-160. Recuperado de: <https://bit.ly/2y3jGhm>
- Peláez, M. y Espinoza, J. (2015). *Energías renovables en el Ecuador: Situación actual, tendencias y perspectivas*. Recuperado de: <https://bit.ly/2xebYki>

- Pérez, J., Aldana, G. y Rojano, R. (2016). Evaluación hidráulica de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) usando un modelo de dispersión axial. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 281-291. Recuperado de: <https://bit.ly/2RmSErX>
- Pérez, B., Díaz, A., De León, A., Saldaña, S., Pérez, Y., Guerrero, C. y Sebastian, P. (2018). Producción de metano a partir de residuos de cultivos de café. *Romanian Biotechnological Letters*, 24(4), 669-675. Recuperado de: <https://bit.ly/39dOsRc>
- Quinchía, Y., Pérez, J., Doria, G. y Sánchez, Y. (2019). Parámetros de calidad de producción de biogás a partir de pulpa de café. *Agricolae & Habitat*, 2(1). Recuperado de: <https://bit.ly/2U9D051>
- Quipezco, L. y Baldeón, W. (2011). Desempeño de un biodigestor cargado con lodo séptico y excreta de cuy para la producción de biogás y biol. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 14(28). Retrieved from <https://bit.ly/2xeurgC>
- Quintero, J, Gámez, C. y Lozano, S. (2018). *Produciendo biogás y abono en mi finca*. Recuperado de: <https://bit.ly/2XmK93U>
- Rodríguez, L. (2020). *Eliminación de altas concentraciones de sulfitos mediante reactor biológico secuencial. Influencia en el rendimiento del proceso* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, España
- Salazar, L., Uribe, L., Gómez, L. y Zafra, C. (2019). Análisis de la eficiencia de reactores UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. *DYNA*, 86(209), 319-326. Recuperado de: <https://bit.ly/3e2Rmw5>
- Sánchez, R. (2015). *Gestión de las aguas residuales de queseras artesanales utilizando producción más limpia y tratamiento anaerobio con RAFA-FAFA*. Recuperado de: <https://bit.ly/3dI26zC>
- Sánchez, J. (2019). *Productos y sub productos de un proceso de biodigestión anaeróbica en un reactor de estructura cilíndrica* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.
- Sarabia, M., Laines, J., Sosa, J. y Escalante, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas

- con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(1), 109-116.
- Seiffert, S., Köhler, C., Plattes, M., Henry, E. y Schosseler, P. (2010). Comparación de tres protocolos de calibración para modelos de lodo activado basados en estudios de casos. En la integración de sistemas de agua. *Actas de la Décima Conferencia Internacional sobre Computación y Control para la Industria del Agua*, CCWI 2009-'Integrating Water Systems ', Sheffield, Reino Unido, 1-3 de septiembre de 2009 (pp. 485-491). CRC Press / Balkema.
- SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo). (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021- Toda una Vida*. Recuperado de: www.planificacion.gob.ec
- Solera del Río, R. (2014). *Aspectos biológicos de la digestión anaeróbica II*. 2 (Vol. 2). Recuperado de: <https://bit.ly/2xmMCjJ>
- Suárez, J, Martín, G, Cepero, L., Blanco, D., Savran, V., Sotolongo, J., López, A., Donis, F., González, O, Peña, A, Hernández, M. y Hernández, M. (2017). *Producción integrada de alimentos y bioenergía: La experiencia cubana*. Recuperado de: <https://bit.ly/3aTlt6V>
- Tapia, S., Vela, R., Miglio, R., Quipuzco, L., Juscamaita, J., Álvarez, C. y Fernández, F. (2019). Puesta en marcha de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales de la crianza intensiva de cerdos. *Agroindustrial Science*, 8(2), 137-145.
- Villarreal, W. (2015). *Diseño para la implementación del sistema de tratamiento de aguas residuales en el estadio de la universidad Técnica del Norte, cantón Ibarra provincia de Imbabura* (tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador
- World Bank. (2017). *Políticas ambientales y sociales para proyectos*. Recuperado de: <https://bit.ly/2VceL5B>

ANEXOS

Anexo A. Registro histórico de producción de biogás

DÍA	Reactor 1 (mL)	Reactor 2 (mL)
1	530	730
2	320	455
3	250	500
4	375	600
5	250	600
6	560	960
7	185	375
8	375	685
9	185	375
10	375	625
11	250	560
12	375	690
13	350	685
14	220	315
15	250	625
16	435	500
17	375	500
18	310	500
19	250	500
20	625	560
21	215	185
22	623	938
23	410	750
24	390	435
25	250	375
26	500	685
27	425	875
28	325	375
29	250	625
30	500	525
Total	10733	17108
Media	358	570

Anexo B. Registro histórico de temperatura ambiente y humedad relativa

Día	Temperatura		Humedad	
	Inicial	Final	Inicial	Final
1	21,8	20,4	58	58
2	21,1	21,0	61	60
3	20,5	21,1	62	58
4	24,7	20,6	56	57
5	27,0	21,1	57	57
6	19,6	20,1	63	58
7	27,6	22,2	61	52
8	23,9	21,2	64	56
9	19,4	20,0	60	52
10	25,5	20,1	52	38
11	23,8	19,9	51	49
12	27,5	20,6	45	62
13	25,1	20,2	55	58
14	22,2	19,7	53	58
15	21,6	22,2	43	37
16	22,2	21,4	49	47
17	23,0	21,8	52	50
18	24,8	22,4	51	52
19	26,4	23,4	46	53
20	24,3	21,5	50	49
21	25,4	22,8	48	45
22	22,7	21,9	47	45
Media	23,6	21,2	53,8	52,3

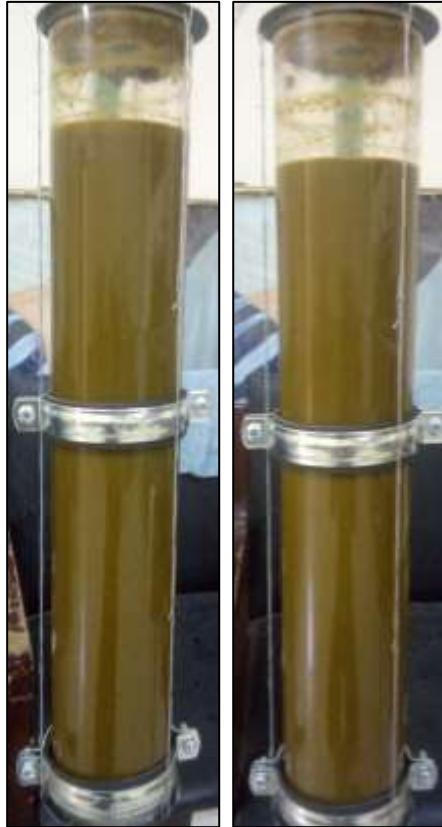
Anexo C. Registro fotográfico



Fotografía 1. Ensamblaje de los reactores



Fotografía 2. Primera carga de materia orgánica en reactor 1



Fotografía 3. Homogenización de la mezcla en los dos modelos de reactor



Fotografía 4. Medición de densidad de las muestras de sustrato de reactores



Fotografía 5. Estratificación de la mezcla en reactor 2 antes de cernir sustrato de ingreso (parte media y superior)



a)



b)

Fotografía 6. a) Atasco de bomba de recirculación por sedimentación. b) Materia orgánica cernida del sustrato de carga de reactores < 3 mm